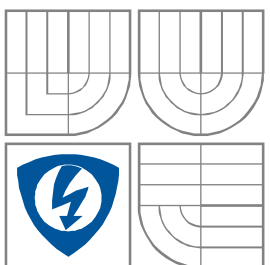


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NÁVRH REPROSOUSTAVY PRO DOMÁCÍ POSLECH

LOUDSPEAKER DESIGN FOR HOME ENVIRONMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Radim Šafer

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Radim Šafer

**ID:** 106801

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh reprosoustavy pro domácí poslech

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete konstrukční, mechanické a elektrické řešení dvoupásmové stereofonní reprosoustavy pro domácí poslech (do 50 W / 4 nebo 8 ohmů, návrh výhybky). Vytvořte návrh, který optimalizujete pro vámi zvolené elektroakustické měniče, použitý materiál reprosoustavy a zvolenou místnost s ohledem na dostupnost realizace. V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (konstrukční řešení, elektrické schéma zapojení výhybek, případně návrh desek plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navrženou reprosoustavu realizujte formou funkčního prototypu a ověřte její činnost.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] TOMAN, K. Reproductory a reprosoustavy. Karviná: Dexon, 2001.
- [2] ŠKVOR, Z. Akustika a elektroakustika. Praha: Academia, 2001.
- [3] COLLOMS, M. High Performance Loudspeakers. Chichester: Wiley, 2005.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 28.5.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Radim Šafer  
Bytem: Kazimíra Rudého 3771, Kroměříž, 767 01  
Narozen/a (datum a místo): 26. dubna 1988 v Kroměříži  
(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací  
technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

#### 1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
  - ☐ diplomová práce
  - ☒ bakalářská práce
  - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh reprosoustavy pro domácí poslech

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- |  |   |                    |
|--|---|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> v tištěné formě      | – | počet exemplářů: 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> v elektronické formě | – | počet exemplářů: 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## ABSTRAKT

Tématem mé bakalářské práce je návrh reprosoustavy pro ozvučení domácích prostor. Zaměřuji se především na simulace reproduktorů, které využívám k samotnému návrhu. Reprosoustava je dvoupásmová stereofonní, optimalizovaná pro basový měnič Beyma 6B30/P a výškový měnič Beyma T2010. Ozvučnice je uzavřená, vyrobena z M.D.F. desky. K jejímu vytlumení je použita polyesterová tlumící vata. Maximální standardizovaný příkon reprosoustavy je 50 W, nominální impedance 8  $\Omega$ , vnitřní objem přibližně 15 litrů, citlivost 90 dB a hmotnost 10 kg.

## ABSTRACT

The subject of my bachelor's thesis is a design of the loudspeaker for home listening. Foremost I focused on simulations of the loud-speakers, which I use to a design itself. The loudspeaker is a two-way and stereophonic, which is optimised for a woofer Beyma 6B30/P and a tweeter Beyma T2010. The enclosure is closed, made of the M.D.F. material. The vibration damping is ensured by a polyester damping cottonwool. The maximum standardised wattage of the loudspeaker is 50 W, nominal impedance is 8  $\Omega$ , internal capacity is around 15 litres, sensitivity 90 dB and weight 10 kg.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Reproduktor, ozvučnice, výhybka, konstrukce reprosoustavy, simulace reproduktoru

## KEYWORDS

Loud-speaker, enclosure, crossover, construction of loudspeaker, simulations of loud-speaker

ŠAFER, R. *Návrh reprosoustavy pro domácí poslech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 40 s., 5 příloh. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh reposoustavy pro domácí poslech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2010

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 28. května 2010

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REPRODUKTOR .....</b>	<b>2</b>
2.1	ROZDĚLENÍ REPRODUKTORŮ PODLE FREKVENČNÍHO ROZSAHU .....	2
2.1.1	Basové reproduktory .....	2
2.1.2	Středotónové reproduktory .....	2
2.1.3	Vysokotónové reproduktory .....	2
2.2	VÝBĚR REPRODUKTORŮ .....	2
2.2.1	Požadované parametry reprosoustavy .....	3
2.2.2	Použité reproduktory .....	4
2.3	MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKY BASOVÉHO REPRODUKTORU BEYMA 6B30/P .....	5
2.3.1	Samotné měření impedanční charakteristiky vlastními prostředky .....	6
2.4	DALŠÍ PARAMETRY REPRODUKTORU .....	8
2.4.1	Charakteristická citlivost .....	8
2.4.2	Činitel jakosti .....	8
2.4.3	Maximální dlouhodobý standardizovaný příkon .....	9
2.5	ELEKTROMECHANICKÁ ANALOGIE REPRODUKTORU .....	9
2.5.1	Náhradní schéma reproduktoru .....	10
<b>3</b>	<b>OZVUČNICE.....</b>	<b>13</b>
3.1	TYPY OZVUČNIC .....	13
3.1.1	Uzavřená ozvučnice .....	13
3.1.2	Bassreflexová ozvučnice .....	14
3.2	NÁVRH OZVUČNICE .....	14
3.2.1	Návrh uzavřené ozvučnice podle normovaných charakteristik .....	15
<b>4</b>	<b>KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ.....</b>	<b>17</b>
4.1	MATERIÁL PRO STAVBU OZVUČNICE .....	17
4.2	TLOUŠŤKA MATERIÁLU .....	17
4.3	SPOJOVÁNÍ DESEK .....	18
4.4	TLUMENÍ OZVUČNICE .....	18
4.4.1	Tlumící materiál ozvučnice .....	18
4.4.2	Tloušťka tlumícího materiálu .....	18
4.5	ROZMÍSTĚNÍ REPRODUKTORŮ NA PŘEDNÍ STĚNĚ .....	19
4.6	KONSTRUKCE OZVUČNICE .....	19
4.6.1	Konstruční schéma pro výrobu ozvučnice .....	20
<b>5</b>	<b>VÝHYBK.....</b>	<b>21</b>
5.1	NÁVRH VÝHYBK .....	22
5.1.1	Hodnoty součástek vypočtené podle vzorců .....	22
5.1.2	Hodnoty součástek nalezené simulací .....	23
5.2	SIMULACE VÝHYBK .....	24
5.3	KONSTRUKČNÍ PODKLADY PRO STAVBU VÝHYBK .....	25
5.3.1	Navržené schéma výhybky .....	25
5.3.2	Deska plošných spojů – spodní strana .....	25
5.3.3	Deska plošných spojů – strana součástek .....	26
5.3.4	Seznam součástek .....	26
<b>6</b>	<b>STAVBA REPROSOUSTAVY .....</b>	<b>27</b>
6.1	REALIZACE VÝHYBK .....	27
6.2	REALIZACE OZVUČNICE .....	27
<b>7</b>	<b>MĚŘENÍ REPROSOUSTAVY .....</b>	<b>30</b>
7.1	SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY REPROSOUSTAVY .....	30
7.2	AMPLITUDOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA REPROSOUSTAVY .....	31
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>34</b>

9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	35
10	SEZNAM ZKRATEK .....	35
11	SEZNAM PŘÍLOH .....	35

## Seznam obrázků

Obr. 1:	Basový hifi reproduktor Beyma 6B30/P .....	4
Obr. 2:	Výškový hifi reproduktor Beyma T-2010 .....	4
Obr. 3:	Popis impedanční křivky basového reproduktoru (převzato z [1]) .....	5
Obr. 4:	Schéma zapojení přístrojů (převzato z [1]) .....	6
Obr. 5:	Naměřený průběh impedanční charakteristiky basového reproduktoru Beyma 6B30/P .....	7
Obr. 6:	Těleso na pružině .....	9
Obr. 7:	Náhradní elektrické schéma reproduktoru Beyma 6B30P v programu PSpice .....	11
Obr. 8:	Střídavá analýza - nastavení frekvenčního rozmítání .....	11
Obr. 9:	Simulace impedančního a fázového frekvenčního průběhu reproduktoru Beyma 6B30P .....	12
Obr. 10:	Náhradní schéma reproduktoru, vestavěného do uzavřené ozvučnice .....	13
Obr. 11:	Náhradní schéma reproduktoru, vestavěného do bassreflexové ozvučnice .....	14
Obr. 12:	Normovaná charakteristika pro reproduktor s $Q_{TS} = 0,55-0,65$ (převzato z [1]) .....	15
Obr. 13:	Simulace průběhu frekvenční charakteristiky v programu AJ Designer .....	16
Obr. 15:	Spojení "na tupo" .....	18
Obr. 14:	Spojení "na pokos" .....	18
Obr. 16:	Konstrukční schéma pro výrobu ozvučnice .....	20
Obr. 17:	Schéma výhybky pro basovou a výškovou větev, zatíženou reproduktory .....	24
Obr. 18:	Simulace amplitudové frekvenční charakteristiky výhybky pro basový a výškový reproduktor .....	24
Obr. 19:	Navržené schéma výhybky .....	25
Obr. 20:	Deska plošného spoje výhybky – bottom (strana spojů), rozměr desky 94 x 77 [mm], měřítko M 1:1 .....	25
Obr. 21:	Deska plošného spoje výhybky – top (strana součástek), rozměr desky 94 x 77 [mm], měřítko M 1:1 .....	26
Obr. 22:	Realizace výhybky .....	27
Obr. 23:	Rohový spoj ozvučnice .....	27
Obr. 24:	Přední a zadní strana ozvučnice .....	28
Obr. 25:	Ozvučnice osazená reproduktory .....	29
Obr. 26:	Směrové charakteristiky reprosoustavy .....	30
Obr. 27:	Amplitudová frekvenční charakteristika reprosoustavy .....	31
Obr. 28:	Amplitudová frekvenční charakteristika reprosoustavy s odpojeným výškový měničem .....	32
Obr. 29:	Amplitudová frekvenční charakteristika reprosoustavy s odpojeným basovým měničem .....	32

## Seznam tabulek

Tab. 1:	Závislost maximálního zvlnění $SPL_{MAX}$ frekvenční char. na činiteli jakosti $Q_{TC}$ .....	15
Tab. 2:	Závislost tloušťky desky ozvučnice na jejím vnitřním objemu .....	17
Tab. 3:	Závislost síly tlumícího materiálu na průměru basového reproduktoru .....	19
Tab. 4:	Seznam součástek pro konstrukci výhybky .....	26



# 1 Úvod

Návrh reprosoustavy pro ozvučení domácích prostor je možné realizovat mnoha způsoby. Záleží především na tom, co od dané audio sestavy člověk požaduje a také to, jaké má k dispozici prostředky pro její realizaci. Požadavky na návrh mohou být různé, například mobilní audio sestava pro ozvučování klubů, nároky posluchače na co možná nejnížší kmitočty nebo domácí reprosoustava pro dlouhodobý poslech. Mým cílem je vytvořit reprosoustavu, která především splňuje požadavky zadání, bude mít co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku, příznivé rozměry a celkové náklady. Při návrhu je brán ohled na dostupnost jednotlivých částí sestavy. Jde o samotné reproduktory, materiál pro konstrukci ozvučnice a především součástky pro výrobu výhybky. Při hledání optimálního řešení reprosoustavy je využíváno simulací reproduktorů, pomocí jejich náhradního elektrického schématu. Pomocí něj je simulována zároveň navržená výhybka, zatíženou reproduktorem, navíc uzavřeného v ozvučnici.

Semestrální projekt je rozdělen na šest kapitol. Kapitola o reproduktorech pojednává blíže o nejdůležitějších vlastnostech měničů. Její součástí je také měření a elektronická simulace reproduktoru. V kapitole o ozvučnici je ukázán jeden způsob jejího návrhu, pomocí normovaných charakteristik. Další část je věnována samotné konstrukci reproduktorové skříně. Popisuje několik aspektů, na které je třeba při stavbě ozvučnice myslet a obsahuje také výsledné konstrukční schéma pro její výrobu. V kapitole o výhybkách je uveden způsob, jakým je možné postupovat při jejich návrhu. Součástí této kapitoly je simulace výhybky, zatížené reproduktorem a také kompletní konstrukční podklady pro její výrobu.

## 2 Reproduktor

Reproduktor, označovaný také jako elektroakustický měnič, slouží k přeměně přiváděné elektrické energie na zvuk. Účinnost této přeměny je velice malá, většina elektrické energie se změní na teplo.

### 2.1 Rozdělení reproduktorů podle frekvenčního rozsahu

U všech reproduktorů je uvedena šířka frekvenčního pásma, kterou dokáže zahrát. To znamená, že v tomto pásmu neklesne hladina akustického tlaku SPL (sound pressure level) o více jak 3 dB. Při konstrukci reprosoustavy, ať už dvoupásmové či třípásmové, je třeba dbát na to, abychom na reproduktor přiváděli jen ty kmitočty, pro které je určen. Jinak hrozí zkreslení reprodukce nebo v horším případě poškození samotného reproduktoru.

#### 2.1.1 Basové reproduktory

Tyto reproduktory, anglicky označované jako Woofers, případně Sub-woofers, jsou určeny k reprodukci nízkých kmitočtů. Frekvenční rozsah se pro každý reproduktor liší, sahá od 20 Hz přibližně do 4 kHz. Obecně platí, že čím větší průměr reproduktoru, tím nižší kmitočty dokáže zahrát a tím větší bude potřebný objem ozvučnice. Na druhou stranu menší reproduktory mívají lepší přenos středních a vyšších kmitočtů, mají lepší dynamické vlastnosti a také méně směřují na vyšších kmitočtech oproti reproduktorům s větším průměrem.

Parametry basového reproduktoru jsou určující pro návrh celé reprosoustavy, proto je jeho výběr jedním z nejdůležitějších kroků při stavbě soustavy. Nejdůležitějšími jeho parametry jsou: rezonanční frekvence  $f_s$ , celkový činitel jakosti  $Q_{TS}$  a ekvivalentní objem  $V_{AS}$ . Dalším parametrem pro výběr reproduktoru je jeho maximální dlouhodobý standardizovaný příkon. Podle něho se udává výkon celé reprosoustavy.

Ve dvoupásmové konstrukci reprosoustavy nahrazuje basový měnič reproduktor středotónový.

#### 2.1.2 Středotónové reproduktory

Jsou označované jako Mid-range. Od basového reproduktoru se liší menšími rozměry. Mají za úkol přenášet frekvence přibližně od 500 Hz do 4 kHz. V třípásmové soustavě patří k nejnámáhavějšímu reproduktoru. Je to proto, že spektrální hustota různých hudebních žánrů a řečových signálů je největší právě v tomto pásmu kmitočtů. Na výslednou kvalitu reprodukce má zásadní vliv, protože přenáší frekvence, na které je lidský sluch nejvíce citlivý (kolem 3 kHz). Proto je účelné, aby jeho frekvenční charakteristika byla co nejvíce plochá.

#### 2.1.3 Vysokotónové reproduktory

Označované jako Tweeter. Jsou určeny pro reprodukci kmitočtů přibližně od 3kHz výše. Ze všech typů reproduktorů jsou nejvíce náchylné na přivedení nižších kmitočtů, než je doporučeno výrobcem. Pro Hi-Fi aplikace se používají kalotové vysokotónové reproduktory, které mají nízké zkreslení a velmi vyrovnanou frekvenční charakteristiku.

## 2.2 Výběr reproduktorů

Výběr těch správných reproduktorů je nejdůležitějším krokem při návrhu reprosoustavy. Pokud vybereme pro náš účel nevhodný měnič, celá soustava nebude dobře hrát, bez ohledu na to, jak kvalitní bude ozvučnice a výhybka. Při výběru jsem bral ohled na zadání práce, mým nárokům na co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku, celkovou cenu

a také na dostupnost jednotlivých částí reprosoustavy. Jde především o samotné reproduktory, materiál ozvučnice a součástek pro výhybku.

### **2.2.1 Požadované parametry reprosoustavy**

Reprosoustava bude sloužit pro ozvučení domácího pokoje, popřípadě větších místností v domě, například obývacího pokoje. Z tohoto požadavku vyplývá příkon reprosoustavy, respektive basového reproduktoru. Byl zvolen příkon 50 W, který je dostatečný pro ozvučení pokoje a zároveň počítá s tím, že se reprosoustava bude moct použít i na ozvučení většího prostoru.

Zadání práce udává, že reprosoustava musí být dvoupásmová. To je další kritérium, podle kterého jsou vybrané dané reproduktory. Ve dvoupásmovém řešení se používá basového reproduktoru v kombinaci s reproduktorem výškovým.

Dalším kritériem pro správný výběr byly mimo jiné mé nároky na parametry reprosoustavy. Je to hlavně co nejvyrovnanější frekvenční charakteristika, s malým zkreslením, pro co nejvěrnější reprodukci a dlouhodobý poslech. Pro tuto konstrukci s co možná nejmenším zkreslením (jeden z hlavních parametrů zařízení hi-fi) se používají kalotové výškové reproduktory. Ty se používají převážně od kmitočtu 3 kHz. Při výběru basového měniče rozhodoval hlavně jeho dolní mezní kmitočet a zvlnění v oblasti nízkých kmitočtů. Reprosoustava budu hlavně využívána pro tichý až středně hlasitý poslech. Z [1] vyplývá, že pro tento poslech je oblast kmitočtů pod 60 Hz málo důležitá a o basovém charakteru rozhoduje hlavně pásmo 60 až 100 Hz.

Dalším, neméně významným kritériem pro výběr reproduktorů, byla jejich cena.

#### Shrnutí:

- Basový reproduktor hifi se jmenovitým příkonem 50 W, s rezonanční frekvencí nejméně 60 Hz, s vyrovnanou frekvenční charakteristikou alespoň do 3 kHz.
- Kalotový výškový hifi reproduktor

## 2.2.2 Použité reproduktory

### Basový hifi reproduktor Beyma 6B30/P

#### Hlavní parametry:

Cena: 608,- / 1kus

- nominální průměr 6,5"
- zatížitelnost 50 RMS W
- impedance 8 Ohm
- citlivost 90 dB/1W,1m
- frekvenční rozsah 50 – 12 000 Hz
- průměr cívky 26 mm
- $f_S$  55 Hz
- $R_E$  5,9 Ohm
- $Q_{TS}$  0,62
- $V_{AS}$  18 l
- $\eta_0$  0,4 %
- $X_{MAX}$  4 mm



Obr. 1: Basový hifi reproduktor Beyma 6B30/P

Detailní informace jsou uvedeny v katalogovém listu v příloze číslo 1.

### Výškový hifi reproduktor Beyma T-2010

#### Hlavní parametry:

Cena: 568,- / 1kus

- zatížitelnost 12 RMS W
- impedance 8 Ohm
- $R_E$  6 Ohm
- citlivost 92 dB/1W,1m
- frekvenční rozsah 1 500 – 20 000 Hz
- doporučená dělicí frekvence 2 000 Hz
- průměr cívky 25,8 mm
- materiál membrány Supranyl
- materiál magnetu Ferit



Obr. 2: Výškový hifi reproduktor Beyma T-2010

Detailní informace jsou uvedeny v katalogovém listu v příloze číslo 2.

## 2.3 Měření impedanční charakteristiky basového reproduktoru BEYMA 6B30/P

Impedance reproduktoru není činný odpor, ale je frekvenčně závislá, komplexního charakteru. Má tudíž svou činnou a reaktanční složku impedance. Obecně ji můžeme vyjádřit jako komplexní číslo ve tvaru [1]:

$$Z = R_E + jX_R \quad (2.1)$$

Měřením reproduktoru dostaneme modul impedance, který se dá zapsat ve tvaru [1]:

$$|Z| = \sqrt{(R_E^2 + X_R^2)} \quad (2.2)$$

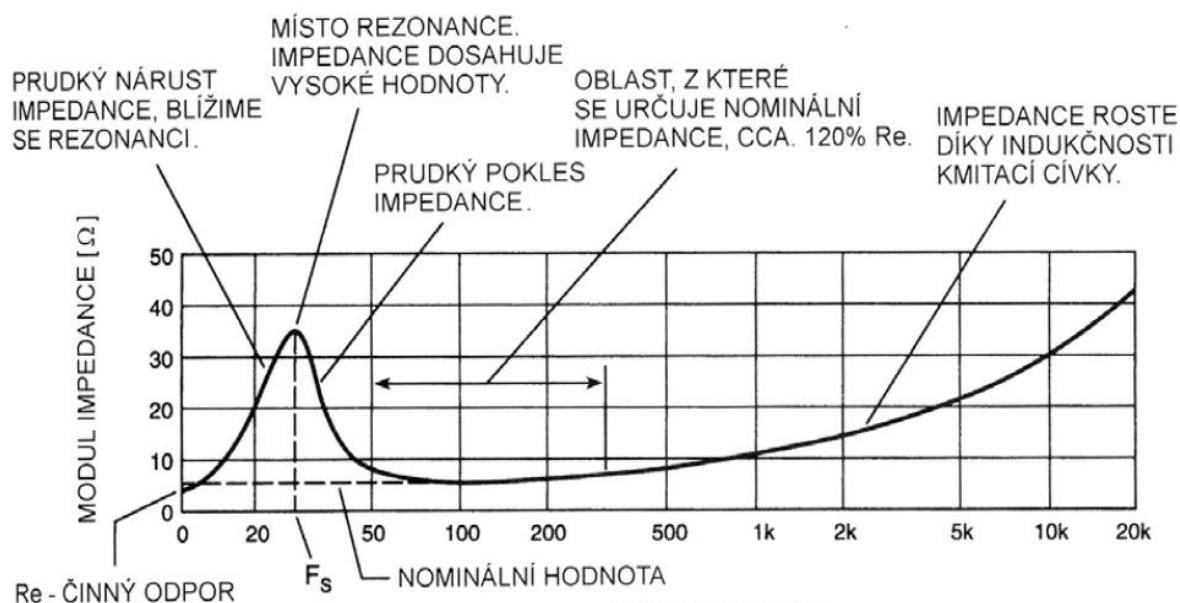
Impedance reproduktoru má i svou fázi, měnící se spolu s frekvencí. Ta je důležitá hlavně pro návrh reproduktorové výhybky.

Z naměřené impedanční charakteristiky můžeme vyčíst několik základních parametrů reproduktoru, jsou to hlavně:

Rezonanční frekvence  $f_s$  – je to místo na charakteristice, kde modul impedance dosáhne své nejvyšší hodnoty. Udává také dolní mezní frekvenci daného reproduktoru. Pokud reproduktor ale osadíme do ozvučnice, rezonanční frekvence se posune směrem k dolním kmitočtům.

Maximální modul impedance  $Z_{MAX}$  – označuje místo rezonance reproduktoru, v tomto místě dosahuje modul impedance svou nejvyšší hodnotu.

Činný odpor kmitací cívky  $R_E$  – je to hodnota impedance, která odpovídá na charakteristice frekvenci 0 Hz.



Obr. 3: Popis impedanční křivky basového reproduktoru (převzato z [1])

Z uvedené impedanční charakteristiky (viz. Obr. 3) lze také vyčíst, že použitý reproduktor měl induktivní charakter – jeho modul impedance se zvyšoval spolu s rostoucí frekvencí. To je typické hlavně pro elektrodynamické reproduktory. Dále je také možno určit nominální hodnotu impedance. Ta se určí jako průměrná minimální hodnota na naměřené charakteristice. Česká norma udává, že modul impedance nesmí být v pracovním pásmu reproduktoru menší, jak 75% nominální impedance. Bývá zpravidla o trochu větší než činný odpor  $R_E$  a má pouze informativní charakter, který nám může pomoci např. při výběru vhodného reproduktoru na daný zesilovač. Zde je nutné dodržet podmínku, že na zesilovač o určitém výstupním odporu lze připojit reproduktor, který má nominální hodnotu impedance stejnou nebo vyšší, ne naopak (např. na zesilovač o výstupním odporu  $R = 8 \Omega$  lze zatížit reproduktorem o nominální impedanci  $Z = 8 \Omega$  nebo  $16 \Omega$ ).

Existuje několik způsobů, jak zjistit nebo získat potřebné parametry (impedanční charakteristiku) reproduktoru:

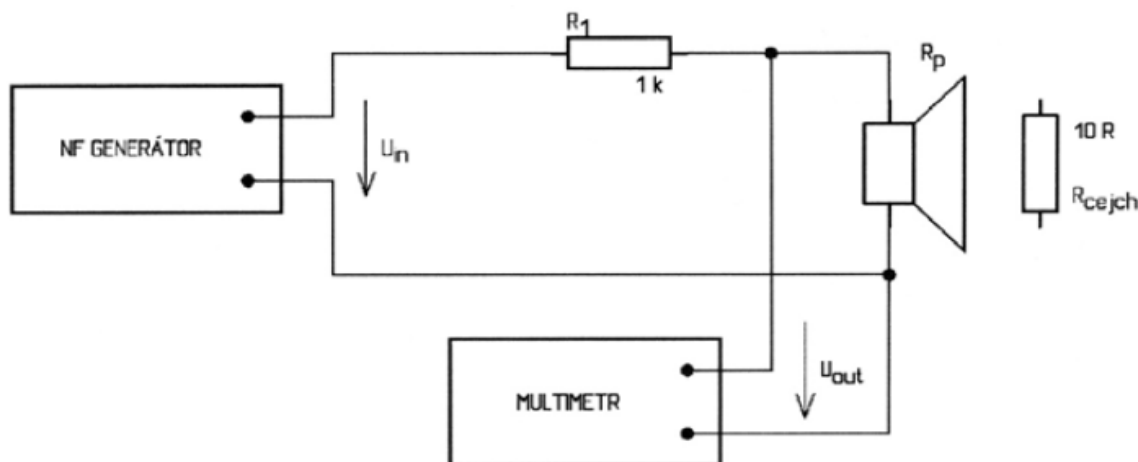
- Zjistit si parametry, které o daném reproduktoru udává od samotného výrobce, například z katalogového listu. Nevýhodu spatřuji hlavně v tom, že reproduktory stejného typu se mohou kus od kusu lišit, tudíž můžete dostat do rukou reproduktor, který nemá požadované vlastnosti. Pokud to výrobce nebo jiný podnik nabízí, jedna z dalších možností je, nechat si u něj reproduktor odměřit.
- Pomocí měřicího software. Hlavní nevýhoda tohoto způsobu je v tom, že počítačový měřicí software je poměrně drahý. Existuje ale několik programů v demo verzi, které umožňují odměření určitých parametrů reproduktoru, například pro odměření impedanční charakteristiky existuje program LIMP od firmy ARTA (<http://www.fesb.hr/~mateljan/arta/index.htm>).
- Odměření impedanční charakteristiky reproduktoru vlastními prostředky.

### 2.3.1 Samotné měření impedanční charakteristiky vlastními prostředky

K měření impedanční charakteristiky reproduktoru byly použity následující měřicí prostředky:

- NF generátor AGILENT 33220A 20 MHz
- Digitální multimetr METEX MXD-4660 A
- Odporová dekáda METRA s přesností  $\pm 0,1 \%$
- Odpor  $10 \Omega$  5 W s přesností  $\pm 5 \%$

Schéma zapojení přístrojů je na Obr. 4:

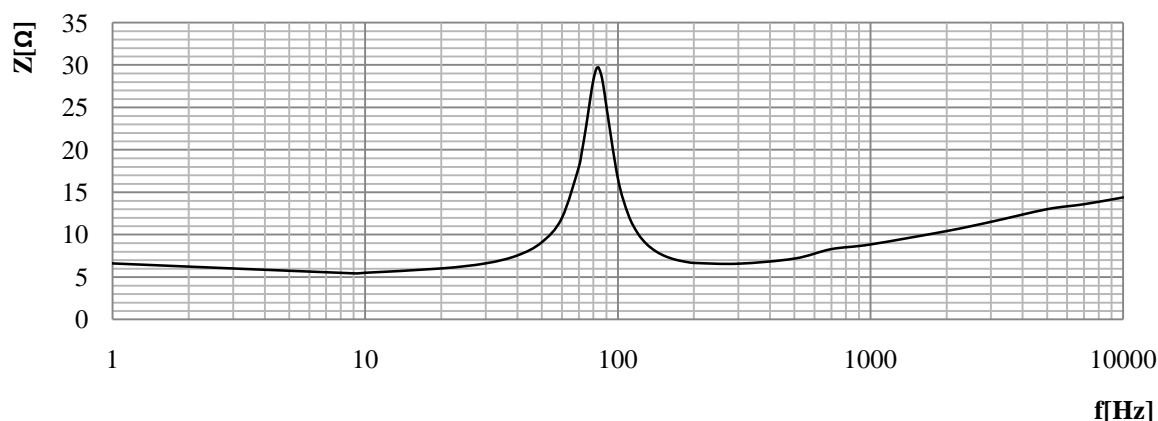


Obr. 4: Schéma zapojení přístrojů (převzato z [1])

Nejdříve se na generátoru nastaví frekvenci  $f = 50 \text{ Hz}$  a takové výstupní napětí  $U_{\text{OUT}}$  (v tomto případě  $10 \text{ mV}$ ), aby údaj na digitálním multimetru v milivoltech odpovídal měřené impedanci v ohmech. Poté byl zapojen měřený basový reproduktor na zesilovač a „hrál“ na muziku přibližně tři čtvrtě hodiny. Použitý zesilovač byl oproti reproduktoru výkonově silnější, tudíž je třeba dávat pozor nato, aby se reproduktor nezničil. Důvod zapojení reproduktoru na zesilovač je hlavně ten, že reproduktor z výroby má ještě „neprotážené“ závěsy a tudíž naměřené hodnoty by mohli být jinak zkreslené. Dalším důvodem je také to, že kmitací cívka se v provozu časem zahřívá a pro dosažení objektivních výsledků měření je dobré ji „zahřát“ na provozní teplotu.

Tabulka naměřených hodnot impedanční charakteristiky je uvedena v příloze číslo 3.

## Impedanční charakteristika



Obr. 5: Naměřený průběh impedanční charakteristiky basového reproduktoru Beyma 6B30/P

Ze změřeného průběhu (viz. Obr. 5) byly určeny následující parametry:

Činný odpor  $R_E = 6,58 \text{ } \Omega$ , maximální impedance  $Z_{\text{MAX}} = 29,72 \text{ } \Omega$ , rezonanční frekvence  $f_s = 83 \text{ Hz}$ ,  $Z_3$  (při  $f_3 = 1 \text{ kHz}$ ) =  $8,82 \text{ } \Omega$ .

Dále vypočítáme [1]:

$$R_0 = \frac{Z_{\text{MAX}}}{R_E} = \frac{29,72}{6,58} = 4,52 \text{ } \Omega \quad (2.3)$$

$$Z_X = R_E \sqrt{R_0} = 6,58 \sqrt{4,52^2} = 13,98 \text{ } \Omega \quad (2.4)$$

K hodnotě  $Z_X$  dohledáme na charakteristice příslušné frekvence  $f_1 = 63 \text{ Hz}$  a  $f_2 = 108 \text{ Hz}$ .

Mechanický činitel jakosti  $Q_{MS}$ :

$$Q_{MS} = f_s \left( \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \right) = 83 \left( \frac{\sqrt{R_0}}{108 - 63} \right) = 3,92 \quad (2.5)$$

Elektrický činitel jakosti  $Q_{ES}$ :

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{(R_0 - 1)} = \frac{3,92}{4,52 - 1} = 1,11 \quad (2.6)$$

Celkový činitel jakosti  $Q_{TS}$ :

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \times Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} = \frac{3,92 \times 1,11}{3,92 + 1,11} = 0,87 \quad (2.7)$$

Indukčnost kmitací cívky  $L_E$ :

$$L_E = \frac{\sqrt{(Z_3^2 - R_E^2)}}{2 \pi f_3} = \frac{\sqrt{(8,82^2 - 6,58^2)}}{2 \pi f_3} = 0,93 \text{ mH} \quad (2.8)$$

Měřením modulu impedance basového reproduktoru Beyma 6B30/P byly určeny jeho parametry důležité pro další návrh reprosoustavy. V porovnání s katalogovými údaji se naměřené hodnoty značně liší. Například naměřená hodnota rezonanční frekvence  $f_s = 83 \text{ Hz}$  je už značně rozdílná od katalogového údaje  $f_s = 55 \text{ Hz}$ . S rezonanční frekvencí  $f_s = 83 \text{ Hz}$  a vysokým elektrickým činitelem jakosti  $Q_{ES} = 1,11$  je návrh pro tyto parametry, vzhledem k požadovaným vlastnostem celé reprosoustavy, nevhodný. S tak vysokým činitelem jakosti bychom nikdy nedosáhli vyrovnané frekvenční charakteristiky a reprosoustavy by nebyla schopna dostatečně zahrát požadované nízké kmitočty v rozsahu 60 – 100 Hz. Možná odchylka může být dána tím, že měřený reproduktor je nový a tudíž ještě nemá rozhybané závěsy. Další nepřesnost mohla být způsobena tím, že jsem měření neprováděl v bezodrazové komoře a tudíž na reproduktor mohli působit odražené zvukové vlny, které způsobily chybu v měření. Proto se bude při dalším návrhu počítat s katalogovými parametry, udávané výrobcem.

## 2.4 Další parametry reproduktoru

### 2.4.1 Charakteristická citlivost

Tento parametr reproduktoru vyjadřuje jeho účinnost produkce zvuku. Je definována jako akustický tlak, který vytvoří reproduktor ve vzdálenosti 1 m při zdánlivém příkonu 1 VA. V reproduktorové technice se používá její vyjádření v decibelech.

### 2.4.2 Činitel jakosti

Dalším parametrem, důležitým pro návrh reprosoustavy, je kromě rezonanční frekvence  $f_s$  také činitel jakosti  $Q$ . Vypovídá o míře ztrát, které jsou dány konečnými hodnotami odporů, a to mechanických i elektrických. Pro popis reproduktoru se používají celkem tři činitele jakosti - elektrický, mechanický a celkový činitel jakosti. Uvádím zde také vztahy pro jejich výpočet [1]:

Mechanický činitel jakosti  $Q_{MS}$ : souvisí s mechanickými ztrátami v kmitacím ústrojí reproduktoru.

$$Q_{MS} = 2\pi f_s \frac{M_{MS}}{R_{MS}} \quad (2.9)$$

Elektrický činitel jakosti  $Q_{ES}$ : zahrnuje v sobě ztráty v kmitací cívce reproduktoru.

$$Q_{ES} = 2\pi f_s \left( \frac{M_{MS} \times R_E}{B l^2} \right) \quad (2.10)$$

Celkový činitel jakosti  $Q_{TS}$ :

$$Q_{TS} = \frac{(Q_{MS} \times Q_{ES})}{(Q_{MS} + Q_{ES})} \quad (2.11)$$



Praktický dopad činitele jakosti, důležitý při návrhu ozvučnice, je vidět na nízkých kmitočtech frekvenční charakteristiky. Čím bude celkový činitel jakosti větší, tím větší bude zvlnění na nízkých frekvencích, na charakteristice bude viditelný značný hrb. S tím je nutno při návrhu počítat. Pro dosažení co nejvyrovnanější amplitudové charakteristiky je vhodné vybrat reproduktor s malým  $Q_{TS}$ , nejlépe do 0,5.

### 2.4.3 Maximální dlouhodobý standardizovaný příkon

Jde o mezní hodnotu příkonu, který reproduktor dokáže snést, aniž by došlo ke změnám jeho parametrů udávané výrobcem. Meze těchto změn jsou určeny jistým standardem. Reproduktor se testuje tzv. IEC signálem. Jde o signál, který má takovou spektrální hustotu, jakou mají průměrně různé hudební žánry a také řečový signál. Vystihuje tak frekvence, které budeme v praxi do reproduktoru přivádět. Testování tímto signálem trvá 100, 80 nebo 8 hodin a po čas testu se měří, zda nedošlo ke změnám například mechanických a elektrických parametrů, charakteristické citlivosti reproduktoru, zkreslení a podobně.

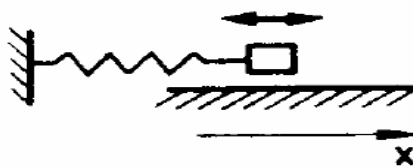
## 2.5 Elektromechanická analogie reproduktoru

Elektromechanická analogie reproduktoru je metoda, pomocí níž, se převede reproduktor, jakožto mechanická (kmitající) soustava na soustavu elektrickou. Takovou soustavu, převedenou na elektrické schéma, už můžeme lépe zkoumat. Můžeme například simulovat jeho chování v příslušných programech (PSpice, Micro Cap, LSP Cad, Snap) a to je velká výhoda.

Reproduktor, stejně tak jako každé mechanické ústrojí, vykazuje jistou hodnotu rezonanční frekvence. Při výběru reproduktoru je to jeden z hlavních parametrů, podle kterých se rozhodujeme. Odvození elektrického schématu reproduktoru vychází z mechaniky. Pokud uvažujeme mechanickou soustavu, a to závaží zavěšené na pružině (viz. Obr. 6), tak takové ústrojí rezonuje na frekvenci [1]:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.12)$$

kde  $k$  je tuhost pružiny a  $m$  hmotnost závaží.



Obr. 6: Těleso na pružině

U reproduktoru představují tuhost závěsy membrány a středící cívka, označuje se jako poddajnost kmitacího systému  $C_{MS}$ . Jde o převrácenou hodnotu tuhosti a je udávána v [m/N]. Hmotnost závaží je pak u reproduktoru všechno to, co kmitá, spolu s kmitajícím sloupcem vzduchu. Jedná se o hmotnost kmitacího systému a sloupce vzduchu  $M_{MS}$  udávané v [kg]. Resonanční frekvence pro reproduktor, vyzařující do volného prostoru je pak [1]:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{C_{MS} \times M_{MS}}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{C_{MS} \times (M_{MD} + 3,227 R_D^3)}} \quad (2.13)$$

kde  $m_D$  je hmotnost kmitajícího systému (bez sloupce vzduchu) a  $r_D$  poloměr membrány reproduktoru.

Srovnáním tohoto vztahu s Thomsonovým vztahem pro výpočet rezonančního kmitočtu rezonančního obvodu, můžeme vytvořit elektrickou analogii reproduktoru k mechanickému systému.

Thomsonův vztah [1]:

$$f_S = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{C \times L}} \quad (2.14)$$

kde  $C$  označuje kapacitu a  $L$  indukčnost. Tyto poznatky se využijí při tvorbě náhradního elektrického schématu reproduktoru. V něm se objeví kondenzátory a indukčnosti.

Ve skutečnosti můžeme mít v praxi dva reproduktory se stejnou rezonanční frekvencí, avšak každý bude hrát „jinak“. Pro vytvoření náhradního schématu je ještě nutné zavést parametr, popisující míru mechanických a elektrických ztrát. Tyto ztráty závisí především na technologii výroby. V našem příkladu mechanického kmitajícího systému má pružina určitý mechanický odpor  $R_M$ . I reproduktor bude mít tzv. mechanický odpor kmitajícího systému a sloupce vzduchu  $R_{MS}$ , udávaný v [Ns/m]. Ve schématu se pak objeví odpory.

Pro analogii k reproduktoru pak platí:

tuhost pružiny  $\frac{1}{k}$  ~ poddajnost kmitajícího systému  $C_{MS}$  ~ kapacita  $C$

hmotnost závaží  $M$  ~ hmotnost kmitacího systému a sloupce vzduchu  $M_{MS}$  ~ indukčnost  $L$

mech. odpor pružiny  $R_M$  ~ mech. odpor kmitajícího systému a sloupce vzduchu  $R_{MS}$  ~ odpor  $R$

Elektromechanická analogie platí nejenom pro obvodové prvky (kondenzátory, indukčnosti a odpory), ale také pro obvodové veličiny (napětí a proud):

síla  $F$  ~ napětí  $U$

rychlost  $v$  ~ proud  $I$

V reproduktoru je umístěna kmitací cívka v magnetu. Jde o vodič délky  $l$ , umístěný v magnetické indukci  $B$ , kterým protéká vstupní proud  $I$ . Na takový vodič působí síla  $F$ . Pokud aplikujeme elektromechanickou analogii, tak vzniká vztah:

$$F = BIl \sim U = BIl$$

Reproduktor se tudíž chová jako gyrátor, transformuje proud na napětí. Tato jeho vlastnost se charakterizuje pomocí gyrační konstanty, u reproduktorů označována jako silový faktor  $Bl$ , udávaný v [N/A].

### 2.5.1 Náhradní schéma reproduktoru

Dané (podle katalogového listu) a vypočtené prvky náhradního schématu reproduktoru jsou [1]:

$$R_1 = R_E = 5,9 \, \Omega \quad (2.14)$$

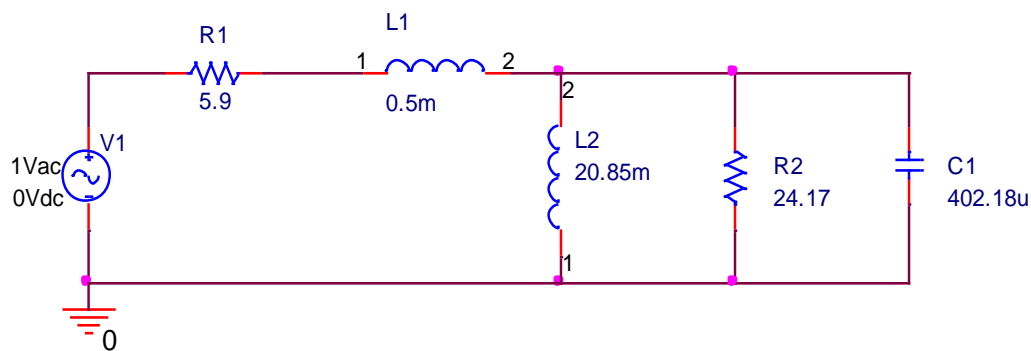
$$L_1 = L_E = 0,5 \, mH \quad (2.15)$$

$$R_2 = \frac{Bl^2}{R_{MS}} = \frac{5,9^2}{1,44} = 24,17 \, \Omega \quad (2.16)$$

$$L_2 = C_{MS} \times Bl^2 = 5,99e^{-4} \times 5,9^2 = 20,85 \, mH \quad (2.17)$$

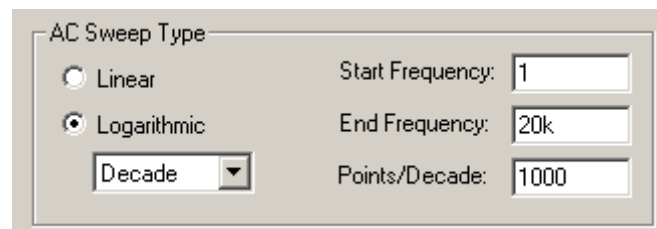
$$C_1 = \frac{M_{MS}}{Bl^2} = \frac{0,014}{5,9^2} = 402,18 \, \mu F \quad (2.18)$$

Náhradní elektrické schéma reproduktoru je pak na Obr. 7:



**Obr. 7: Náhradní elektrické schéma reproduktoru Beyma 6B30P v programu PSpice**

Pro simulaci impedanční a fázové charakteristiky v programu PSpice musíme zvolit a nastavit střídavou analýzu (AC Sweep). Konkrétně bylo použito následující nastavení frekvenčního rozmítání na Obr. 8:

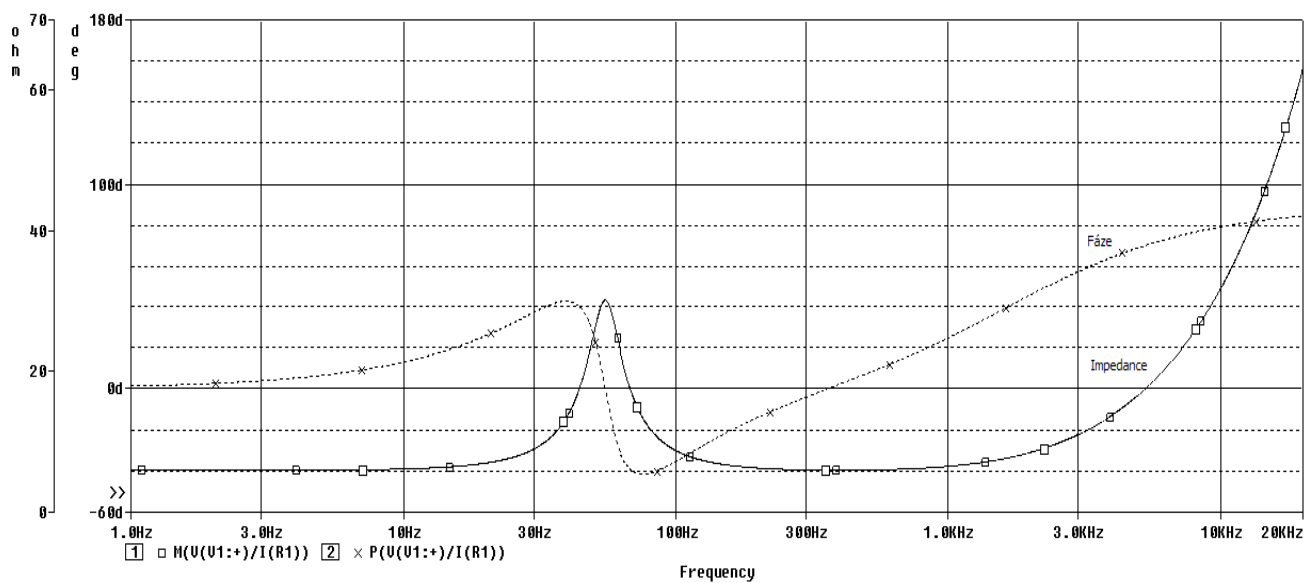


**Obr. 8: Střídavá analýza - nastavení frekvenčního rozmítání**

Abychom získali frekvenční průběh impedance a fáze (viz. Obr. 9), musíme nastavit sekci Probe v PSpice následovně:

Pro modul impedance:  $M(V(V1:+)/I(R1))$

Pro fázi ve stupních:  $P(V(V1:+)/I(R1))$



Obr. 9: Simulace impedančního a fázového frekvenčního průběhu reproduktoru Beyma 6B30P

## 3 Ozvučnice

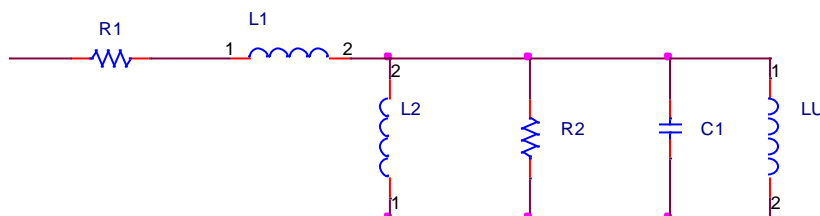
Elektroakustické měniče jsou uchyceny v reproduktorové bedně, skříni, odborně nazývané ozvučnice. Ta slouží nejenom k mechanickému upevnění měničů, ale hlavně k oddělení zvukové (tlakové) vlny, vyzařované přední stranou membrány od zvukové vlny, vyzařované zadní stranou membrány. Tyto vlny mají opačnou fázi a mají tendenci se navzájem vyrušit, hlavně na nízkých kmitočtech. Tomuto jevu se říká akustický zkrat. Abychom tomu předešli, instalujeme měniče do ozvučnice. Ozvučnic existuje mnoho typů, těmi nejčastějšími je uzavřená a bassreflexová ozvučnice.

### 3.1 Typy ozvučnic

#### 3.1.1 Uzavřená ozvučnice

Tato ozvučnice je ideálně hermeticky (dokonale) uzavřená skříň určitého objemu. Reprodukter je do skříně vestavěn takovým způsobem, aby přední část membrány vyzařovala do vnějšího prostoru a zadní část do vnitřního prostoru skříně. Pokud je skříň dokonale utěsněná a zvukově nepropustná, zůstane energie, vyzářená zadní stranou membrány uvnitř skříně a posléze se přemění v teplo. Tím potlačuje nepříznivé ovlivňování přední a zadní vlny.

Avšak v důsledku toho, že instalujeme reproduktor do uzavřené ozvučnice, měníme jeho vlastnosti. Při pohybu membrány „ven“ se bude vzduch uvnitř ozvučnice roztahovat a při pohybu „dovnitř“ zase stlačovat. K tomu je zapotřebí přídatná síla, potřebná k pohybu membrány. Reprodukter se bude chovat, jakoby měl tužší závěs. V náhradním schématu reproduktoru se to projeví paralelní indukčností  $L_U$ , připojené k indukčnosti  $L_2$ , představující tuhost závěsu reproduktoru (viz. Obr. 10).



Obr. 10: Náhradní schéma reproduktoru, vestavěného do uzavřené ozvučnice

V praxi se však parametry reproduktorů neudávají v ekvivalentních veličinách pro náhradní schéma, ale namísto toho se používá tzv. ekvivalentní objem reproduktoru  $V_{AS}$ . Tato veličina nahrazuje tuhost reproduktoru, udává, jaké množství vzduchu v jistém uzavřeném objemu má stejnou tuhost, jako skutečná tuhost kmitacího systému reproduktoru.

Pokud má reproduktor, vestavěný do uzavřené ozvučnice objemu  $V_B$ , vyšší tuhost, bude mít tudíž i vyšší rezonanční frekvenci  $f_{SU}$  [1]:

$$f_{SU} = f_S \sqrt{\left(1 + \frac{L_2}{L_U}\right)} \sim f_{SU} = f_S \sqrt{\left(1 + \frac{V_{AS}}{V_B}\right)} \quad (3.1)$$

Stejně tak jako rezonanční kmitočet se zvýší i činitel jakosti  $Q_{TS}$ , pro nový činitel jakosti  $Q_{TC}$  platí [1]:

$$Q_{TC} = Q_{TS} \sqrt{\left(1 + \frac{V_{AS}}{V_B}\right)} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 Bassreflexová ozvučnice

Nevýhoda uzavřené ozvučnice je ta, že vlastně ničí zvukovou vlnu, vyzařovanou zadní stranou membrány (přeměňuje se na teplo). Problém je ten, že „přední“ zvuková vlna má opačnou polaritu než „zadní“. Potřebujeme tedy jistý akustický obvod, který pro určité kmitočty přepóluje „zadní“ vlnu. Následně ji pak můžeme využít, aniž by došlo k akustickému zkratu. V praktické konstrukci ozvučnice to znamená, že „zadní“ vlnu, vyzářenou do vnitřního prostoru ozvučnice vyvedeme do vnějšího prostoru, přes příslušný akustický obvod. Nejpoužívanější takovou konstrukcí je bassreflexová ozvučnice.

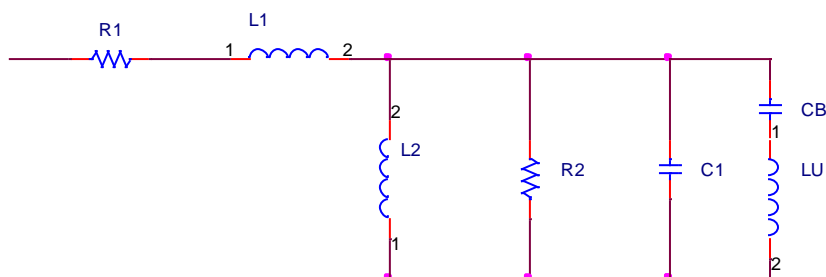
Akustický obvod zde tvoří jakási „díra“, odborně nazývaná bassreflexový nátrubek, který spojuje vnitřní objem skříně s vnějším prostorem. Nátrubek bude v elektromechanické analogii představovat nový rezonanční obvod s rezonanční frekvencí  $f_B$ , a to nižší, než rezonanční frekvenci uzavřené reprosoustavy  $f_{SU}$  [1]:

$$f_B = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_B(l + 0,96\sqrt{S})}} \quad (3.3)$$

kde  $V_B$  značí objem ozvučnice,  $S$  průřez nátrubku a  $l$  délku nátrubku.

Bassreflexový nátrubek vlastně natáhne frekvenční charakteristiku směrem k dolním kmitočtům. Taková reprosoustava pak zahraje takové frekvence, které původní (uzavřená) reprosoustava nedokázala.

Pro ozvučnici s bassreflexovým nátrubkem lze odvodit zjednodušené náhradní schéma, kde kondenzátor  $C_B$  představuje hmotnost vzduchu stlačovaného v bassreflexovém nátrubku (viz. Obr. 11).



Obr. 11: Náhradní schéma reproduktoru, vestavěného do bassreflexové ozvučnice

## 3.2 Návrh ozvučnice

Při návrhu ozvučnice požadují od reprosoustavy vyrovnanou frekvenční charakteristiku a zajímá mě, jaký objem ozvučnice ji dokáže „vyrobit“. S tvarem frekvenční charakteristiky úzce souvisí činitel jakosti reprosoustavy  $Q_{TC}$  (viz. Tab. 1). Výšku hrbu na frekvenční charakteristice v závislosti na činiteli jakosti  $Q_{TC}$  popisuje vztah [1]:

$$SPL_{PEAK} = 20 \log \sqrt{\frac{Q_{TC}^4}{Q_{TC}^2 - 0,25}} \quad \text{pro } Q_{TC} \geq 0,707 \quad (3.4)$$

Tab. 1: Závislost max. zvlnění  $SPL_{MAX}$  frekvenční char. na činiteli jakosti  $Q_{TC}$  (převzato z [1])

činitel jakosti $Q_{TC}$	maximální zvlnění $SPL_{MAX}$ [dB]
0,707	0
0,956	1
1,129	2
1,304	3

Z toho vyplývá, že pokud je činitel jakosti reproduktoru vyšší než 0,707 je na jeho charakteristice převýšení i bez ozvučnice. Použitím takového reproduktoru v bassreflexové ozvučnici by se charakteristika ještě více „zvlnila“. Pro použití v bassreflexové ozvučnici jsou podle [2] nejvhodnější reproduktory s činitelem jakosti v rozmezí 0,25 až 0,5. Reprodukter Beyma 6B30/P má činitel jakosti  $Q_{TS} = 0,62$ , proto použijí uzavřenou ozvučnici. Existuje několik metod pro návrh této ozvučnice. V mém návrhu je použita metoda návrhu podle normovaných charakteristik.

### 3.2.1 Návrh uzavřené ozvučnice podle normovaných charakteristik

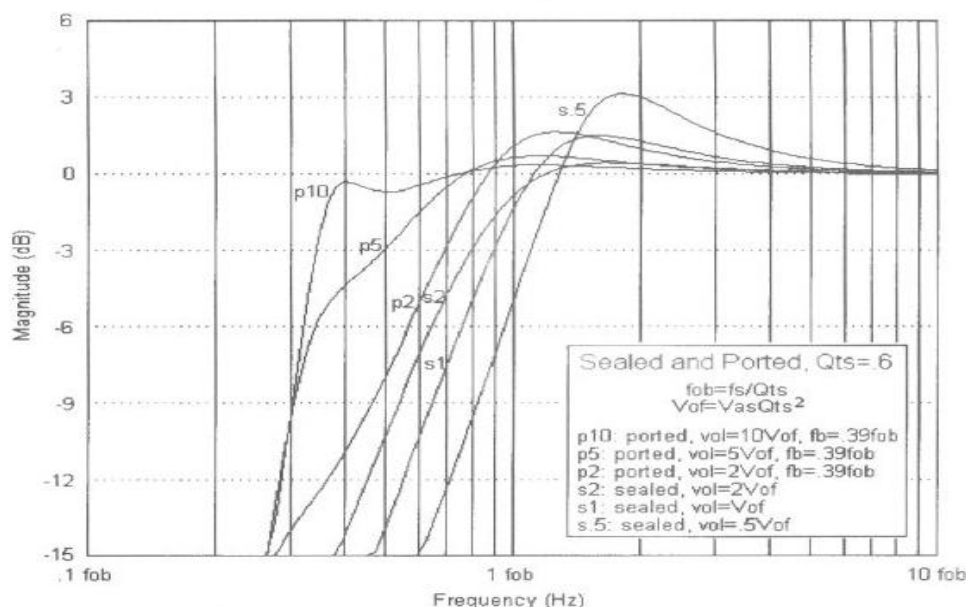
Každé hodnotě činitele jakosti reproduktoru  $Q_{TS}$  odpovídá sada charakteristik (viz. Obr. 12). Vybereme si, jaká charakteristika nejlépe odpovídá našemu záměru a tomu bude odpovídat určitý objem ozvučnice.

Máme reproduktor Beyma 6B30/P o parametrech  $f_s = 55$  Hz,  $Q_{TS} = 0,62$ ,  $V_{AS} = 18$  l. Nejdříve spočítáme pomocné hodnoty [1]:

$$f_{OB} = \frac{f_s}{Q_{TS}} = \frac{55}{0,62} = 88,71 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

$$V_{OF} = V_{AS} \times Q_{TS}^2 = 18 \times 0,62^2 = 6,93 \text{ l} \quad (3.6)$$

Vybereme sadu charakteristik, odpovídající našemu  $Q_{TS}$ , zaokrouhleného na jedno desetinné místo, v našem případě  $Q_{TS} = 0,6$  a použijeme uzavřenou (sealed) ozvučnici.



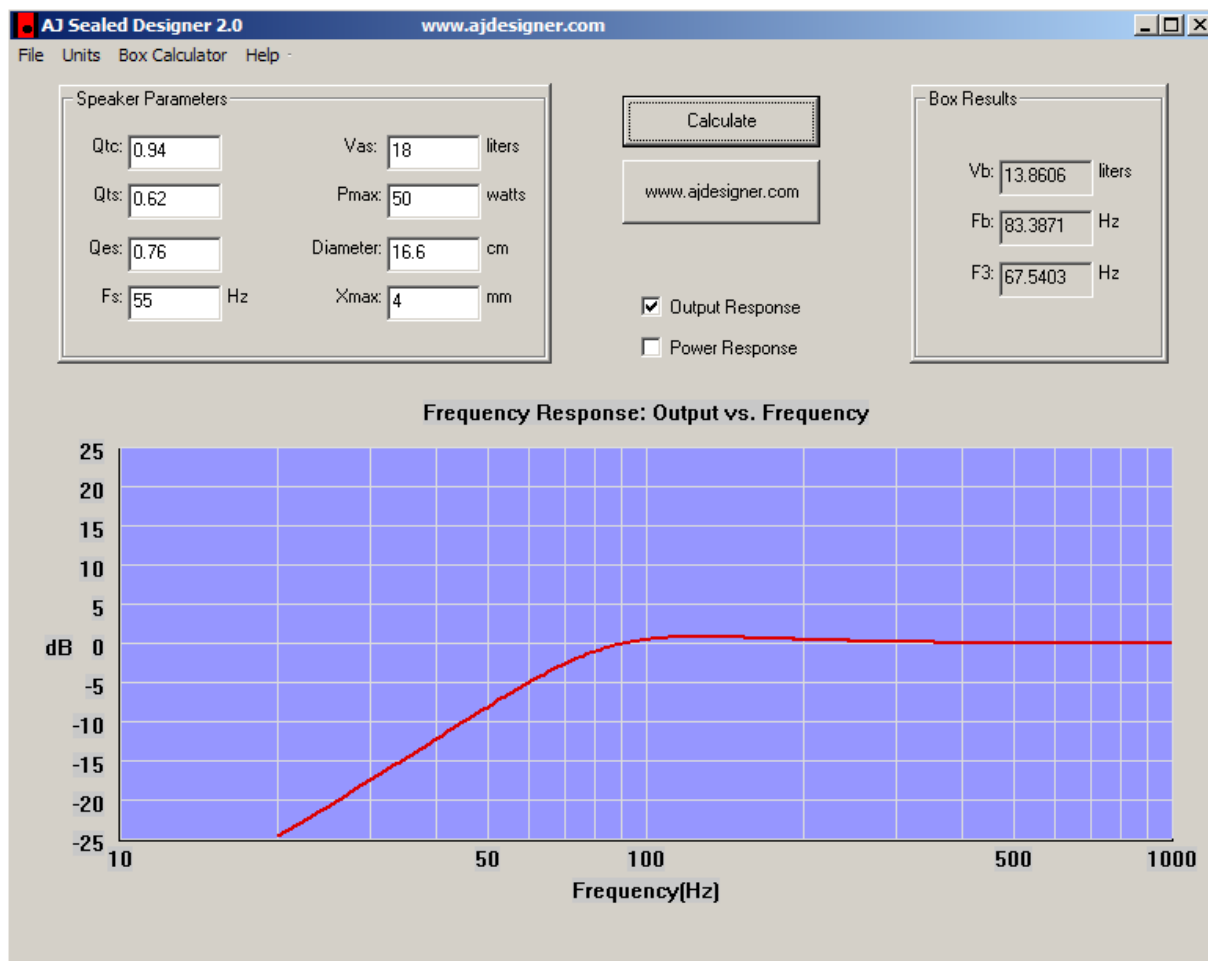
Obr. 12: Normovaná charakteristika pro reproduktor s  $Q_{TS} = 0,55 - 0,65$  (převzato z [1])

Abychom dosáhli co nejmenšího zvlnění, vybereme průběh frekvenční charakteristiky S2. Tomu odpovídá objem reprosoustavy  $V_B$  (VOL):

$$V_B = 2 \times V_{OF} = 2 \times 6,93 = 13,86 \text{ l} \sim 14 \text{ l} \quad (3.7)$$

Hodnota 1 fob na charakteristice S2 odpovídá pro náš reproduktor frekvenci 88,71 Hz. K poklesu o -3 dB dojde kolem frekvence 70 Hz. Takto navržená reprosoustava by tudíž měla hrát basy vyrovnaně od 70 Hz, nižší kmitočty už s útlumem vyšším než -3 dB.

Pro kontrolu byla frekvenční charakteristika ještě odsimulována v programu pro návrh ozvučnic AJ Designer (viz. Obr. 13).



Obr. 13: Simulace průběhu frekvenční charakteristiky v programu AJ Designer

Vypočtenému objemu ozvučnice  $V_B = 13,86$  odpovídá pokles o -3 dB na frekvenci 67,5 Hz a činitel jakosti uzavřené reprosoustavy  $Q_{TC} = 0,94$ . To podle tabulky odpovídá maximální zvlnění na frekvenční charakteristice menší jak 1 dB. Ze simulace je zřejmé, že zvyšováním objemu ozvučnice dosáhneme menšího zvlnění na charakteristice. Vypočtený objem ozvučnice  $V_B = 13,86$  tak udává, jaký minimální objem můžeme použít, pokud chceme dosáhnout zvlnění na frekvenční charakteristice menší jak 1 dB.



## 4 Konstrukce reproduktorové skříně

### 4.1 Materiál pro stavbu ozvučnice

Materiál vhodný pro konstrukci reproduktorové skříně by měl být tuhý a těžký. S těžkým materiálem bude mít sestava velkou hmotnost, ale to není tak podstatné při konstrukci malých Hi-fi beden. Jejich vnitřní objem je poměrně malý a jsou určeny pro ozvučení jednoho pokoje, takže odpadá nutnost jejich převážení. Další vlastnost, kterou by měl materiál mít, je velké vnitřní tlumení. Je to proto, aby odražené zvukové vlny, vzniklé uvnitř ozvučnice, nějak neovlivňovaly reproduktory (hlavně středový a výškový). Další důležitou vlastností je dobrá opracovatelnost materiálu. Tyto požadavky splňují následující materiály:

#### Březová překližka

Jde o velmi silný a tuhý materiál. Má několik souvislých vrstev bez vnitřních dutin. Je hojně používaná pro stavbu profesionálních reprosoustavy.

#### D.T.D. – Dřevotřísková deska

Je také hodně používaná pro stavbu. Je levná, má však menší tuhost a vnitřní tlumení oproti překližce a M.D.F. desce.

#### M.D.F. deska – Medium Density Fibre Plate

Je to materiál podobný dřevotřískce, avšak dřevěné piliny jsou velmi jemné a při výrobě jsou stlačovány pod velkým tlakem, spolu s chemickými přísadami. Tím je dosaženo velmi velké pevnosti. Tyto desky mají také velmi hladký povrch a hodí se tak pro následnou úpravu například malováním, lakováním. Jejich nevýhoda, spolu s D.T.D. je ta, že se nemůže použít ve venkovních prostorách, kde by byla vystavena vlhku a vodě. Při stavbě domácího ozvučení to ale nehraje roli.

#### Beton, mramor, železo, ocel

Výhodou všech těchto materiálů je jejich vysoká pevnost. Jsou vhodné pro konstrukci malých Hi-fi reprosoustavy. Nevýhodou je malé vnitřní tlumení, které pak musí „zastat“ tlumící rouno. Další nevýhodou těchto materiálů je jejich velká hmotnost.

### 4.2 Tloušťka materiálu

Obecně platí, že čím větší vnitřní objem ozvučnice má, tím silnější materiál se použije (viz. Tab. 2). V tabulce jsou uvedeny přibližné tloušťky, které se používají v praxi.

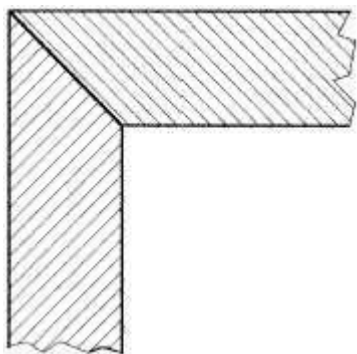
Tab. 2: Závislost tloušťky desky ozvučnice na jejím vnitřním objemu

Vnitřní objem ozvučnice [dm <sup>3</sup> ]	Tloušťka desky ozvučnice [mm]
menší než 5	do 12
5 - 20	15 - 18
větší než 20	větší než 18

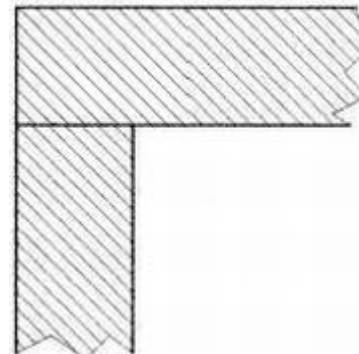
Při výběru vhodného materiálu a jeho tloušťky hraje významnou roli také jeho dostupnost a cena.

### 4.3 Spojování desek

Nejčastějšími dvěma způsoby, jak spojit jednotlivé desky, je „na tupo“ a „na pokos“. Spojení „na tupo“ (viz. Obr. 14) je tím nejjednodušším na výrobu, avšak spojení je nejméně pevné a při použití dřevotřískových desek také nevzhledné (je vidět vnitřní struktura D.T.D. a M.D.F.). Vhodnějším spojením z hlediska vzhledu i pevnosti je „na pokos“ (viz. Obr. 15). Větší pevnosti je dosaženo na základě většího využití plochy samotného spoje. Pro další zpevnění se používají vyztužovací hranolky, umístěné do rohů reproduktorové skříně nebo profesionálnější kolíky. Všechny spoje musí být před samotným lepením kvalitně opracovány, aby jednotlivé styčné plochy na sebe dobře přiléhali. Celkový objem skříně musí být navíc dokonale (hermeticky) uzavřen, pro utěsnění se nejčastěji používá silikonový tmel.



Obr. 15: Spojení "na pokos"



Obr. 14: Spojení "na tupo"

### 4.4 Tlumení ozvučnice

Nejvýznamnější funkcí tlumení je zabránění vzniku stojatého vlnění uvnitř ozvučnice. To vzniká v ozvučnici sloučením přímé zvukové vlny spolu se všemi odraženými. Pokud bude fáze odražené vlny stejná jako té přímé, vlny se sečtou a na tomto místě vznikne tzv. kmitna (maximum) intenzity zvuku. Naopak zase při opačné fázi odražené vlny oproti přímé vznikne tzv. uzel (minimum) intenzity zvuku. Čím větší bude odrazivost ploch uvnitř ozvučnice, tím více se těchto maxim (minim) vytvoří. Frekvenční pozice těchto míst se určí ze vzorce [1]:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \Rightarrow f = 2^k \times \frac{340}{l} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

kde  $l$  je příslušný rozměr soustavy v [m] a čísla  $k$  jsou tzv. módy, odpovídající násobkům vlnové délky  $\lambda$ . Na frekvenční charakteristice se na těchto kmitočtech objeví zvlnění, proto je nutné zvukové vlny uvnitř ozvučnice tlumit.

Nejběžnějším způsobem tlumení je umístění tlumícího materiálu na zadní, horní, spodní, levou a pravou stěnu, případně i na přední. Při použití výztuže uvnitř ozvučnice je vhodné obalit tuto výztuhu tlumícím materiálem. K jednotlivým stěnám se tlumící materiál přichycuje nejčastěji lepením.

#### 4.4.1 Tlumící materiál ozvučnice

Jako tlumící materiál uvnitř ozvučnice se používá například vatelín, vata, skelná vata, igelit nebo tzv. tlumící rouno s vysokou pohltivostí.

#### 4.4.2 Tloušťka tlumícího materiálu

V následující tabulce (Tab. 3) jsou uvedeny přibližné tloušťky tlumícího materiálu, které se v praxi určují podle velikosti basového reproduktoru.

**Tab. 3: Závislost síly tlumicího materiálu na průměru basového reproduktoru**

Průměr reproduktoru [cm]	Síla tlumicího materiálu [mm]
10	přibližně 10
15	15
20	20
30	30

Rozhoduje také dostupnost tlumicího materiálu určité tloušťky. Při nemožnosti získat tlumicí materiál s požadovanou tloušťkou, je lépe použít silnější než slabší materiál.

#### 4.5 Rozmístění reproduktorů na přední stěně

Na vzájemné rozteči os reproduktorů závisí výsledná směrová charakteristika reprosoustavy. Dále závisí také na strmosti a dělicím kmitočtu použité výhybky. V praxi se používá rozteč výškového a středového (v našem případě basového) reproduktoru podle vzorce [1]:

$$d = \frac{425}{f_D} \quad (4.2)$$

kde  $f_D$  je dělicí kmitočet výhybky. Vzorec je určen pro 5/4 vlnové délky odpovídajícího dělicího kmitočtu.

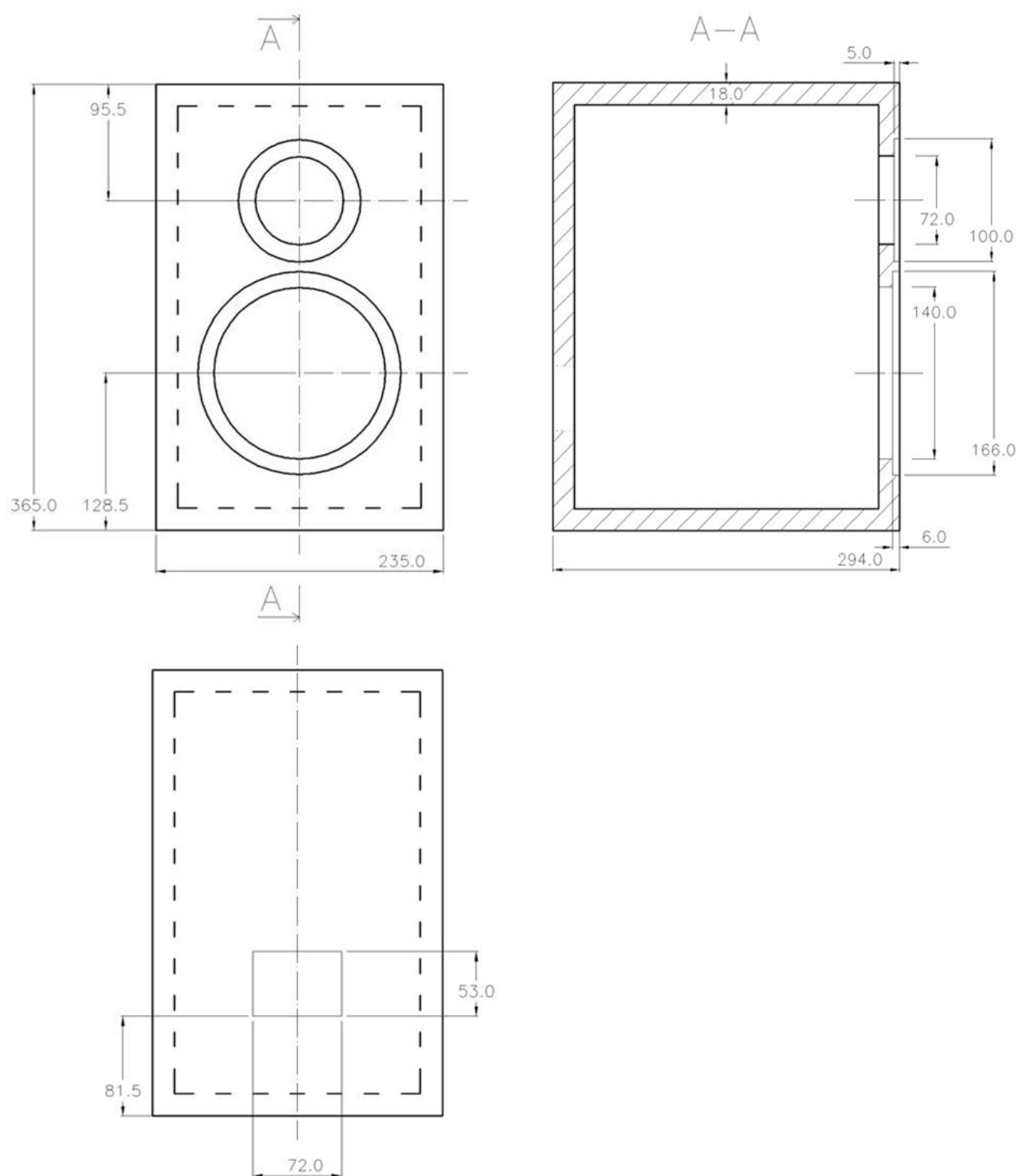
Vysokotónový reproduktor by měl být zapuštěn do přední stěny, aby se předešlo difrakcím. Basový reproduktor je v dvoupásmovém uspořádání také možno zapustit do přední stěny. Rozmístění obou reproduktorů je nejčastěji symetrické podle svislé osy. Při konstrukci je také vhodné zaoblit nebo zkosit rohy a hrany reproduktorové skříně, kvůli případným difrakcím.

#### 4.6 Konstrukce ozvučnice

Při návrhu konstrukčního řešení ozvučnice jsem počítal s tloušťkou materiálu na stavbu ozvučnice a tloušťkou tlumicího materiálu 18 mm. Rozteč basového a výškového reproduktoru vychází z dělicí frekvence výhybky  $f_d = 3\text{kHz}$ . Rozměry jednotlivých stran jsou zvoleny tak, aby reprosoustava splňovala minimální čistý vnitřní objem a zároveň nebyla příliš velká. Je zde započítán i objem, který zabírají reproduktory (hlavně basový). Pro poměr stran jsem zvolil tzv. golden ratio. Je to poměr stran (š x v x h) 1 : 1,56 : 1,25; (může se také použít 1 : 2,61 : 1,61). Tento poměr se volí proto, aby se minimalizovaly vlastní kmitočty uvnitř reproduktorové skříně.

#### 4.6.1 Konstruční schéma pro výrobu ozvučnice

Pro zhotovení konstrukčních podkladů k výrobě ozvučnice je použit návrhový systém AutoCad. Výsledné podklady pro stavbu jsou na Obr. 16:



Obr. 16: Konstruční schéma pro výrobu ozvučnice

## 5 Výhybka

Výhybka pro reproduktorovou soustavu je dělicím filtrem, sloužícímu k rozdělení celkového kmitočtového pásma do několika dílčích pásem. Používá se, protože neexistuje reproduktor, který by dokázal zahrát celé slyšitelné pásmo kmitočtů s dostatečným akustickým výkonem, malou směrovostí a nízkým zkreslením. Souvisí to se vztahem podle [1] pro vyzařený akustický výkon [W]:

$$P_A = 0,859 \cdot S_D^2 \cdot X \cdot f^4 \quad (5.1)$$

kde  $X$  je efektivní hodnota výchylky membrány,  $S_D$  je plocha membrány a  $f$  je frekvence signálu. Vzorec udává, že nízké kmitočty vyžadují větší výchylku a plochu membrány než kmitočty vyšší (pro dosažení stejného akustického výkonu). Proto se pro reprodukci nízkých kmitočtů použije reproduktor s velkým průměrem membrány a na vysoké kmitočty reproduktor s malým průměrem.

Podle počtu pásem se používají různé kombinace propustí. Pro dvoupásmovou reprosoustavu se používá kombinace výhybky typu dolní a horní propust. Při návrhu musíme definovat dělicí frekvenci  $f_D$ . Je třeba uvažovat vlastnosti jak basového, tak výškového reproduktoru. Basový reproduktor mívá na vyšších kmitočtech nevyrovnanou frekvenční charakteristiku. Volba nízké dělicí frekvence není zase vhodná pro výškový reproduktor, ten se může přivedením příliš nízkých kmitočtů spálit.

Výhybky můžeme rozdělit na aktivní nevýkonové a pasivní výkonové. Aktivní nevýkonové výhybky jsou zařazeny ještě před zesilovačem, který již frekvenčně „ořezaný“ signál zesílí a následně budí reproduktory. Jejich výhodou je především v možnosti realizovat přenosovou charakteristiku požadovaného tvaru. Pasivní výkonové výhybky jsou zařazeny až za zesilovač a na jejich výstupu je zapojen reproduktor. Výhoda takovéto výhybky je především v její dostupnosti, snadné realizaci a ceně.

Důležitou vlastností výhybky je její strmost. U reproduktorových soustav se používá vyjádření strmosti v dB na oktavu [dB/okt]. Ideální výhybka je taková, když po sečtení přerozdělených signálů (v našem případě dolní a horní propustí) dostaneme stejný signál, jako ten, který jsme přivedli na vstup obou propustí. Matematicky to znamená, že komplexní přenosy obou filtrů (propustí) dávají v součtu jedničku (na žádném kmitočtu výhybka nezesiluje ani nezeslabuje) [1]:

$$L(j\omega) + H(j\omega) = 1 \quad (5.2)$$

kde  $L(j\omega)$  je přenosová funkce dolní propusti a  $H(j\omega)$  přenosová funkce horní propusti. Tohle platí podle [2] pro výhybky se strmostí 6 dB/okt. Použitím výhybek větších strmostí snižujeme šířku kmitočtového pásma, které současně přenáší oba reproduktory a to je žádoucí. Zároveň tím však ale zhoršuje průběh fáze součtového signálu obou propustí.

Dalším kritériem při návrhu výhybky je použitá aproximace. V reproduktorové technice se používají především filtry typu Linkwitz – Riley, mající konstantní součtovou amplitudovou charakteristiku [1]:

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = k \quad (5.3)$$

kde  $k$  je reálná konstanta. Dalším typem je Butterworthova aproximace, mající při shodném dělicím kmitočtu pro dolní a horní propust konstantní součtovou výkonovou charakteristiku:

$$|L(j\omega)|^2 + |H(j\omega)|^2 = k \quad (5.4)$$

## 5.1 Návrh výhybky

Při návrhu výhybky bylo vycházeno ze vzorců pro propusti typu Linkwitz – Riley. Pro dolní propust byla zvolena strmost 12 db/okt, pro výškovou větev 18 dB/okt. Vzorce pro výpočet hodnot součástek těchto propustí jsou podle [1]:

$$L_{11} = \frac{Z_D}{\pi \cdot f_{DD}}, \quad C_{11} = \frac{1}{4\pi \cdot f_{DD} \cdot Z_D}, \quad (5.5), (5.6)$$

$$L_{21} = \frac{3Z_H}{8\pi \cdot f_{DH}}, \quad C_{21} = \frac{1}{3\pi \cdot f_{DH} \cdot Z_V}, \quad C_{22} = 3C_{21} \quad (5.7), (5.8), (5.9)$$

kde  $L_{11}$  a  $C_{11}$  jsou hodnoty součástek dolní propusti,  $L_{21}$  a  $C_{21}$  hodnoty součástek horní propusti,  $Z_D$  nominální impedance basového reproduktoru,  $Z_H$  nominální impedance výškového reproduktoru,  $f_{DD}$  dolní dělicí kmitočet a  $f_{DH}$  horní dělicí kmitočet.

Tyto vzorce vycházejí z toho, že je reproduktor zatížen frekvenčně závislou impedancí. Reálný reproduktor má však impedanci značně frekvenčně závislou, tudíž jsou hodnoty takto vypočítaných součástek pouze informativní. Problémem je hlavně indukčnost reproduktoru, v dvoupásmové reprosoustavě především basového. Tu lze vykompenzovat připojením RC členu paralelně k reproduktoru. Tato metoda se nazývá kompenzace indukčnosti kmitačky. Hodnoty součástek RC členu určíme přibližně ze vzorců podle [1]:

$$R_{11} = R_E, \quad C_{12} = \frac{L_E}{R_E^2} \quad (5.10), (5.11)$$

kde  $R_{11}$  a  $C_{12}$  jsou hodnoty součástek RC členu,  $R_E$  stejnosměrný odpor cívky basového reproduktoru a  $L_E$  indukčnost kmitací cívky basového reproduktoru.

U výškových reproduktorů se projevuje hlavně velké zvětšení impedance v okolí rezonančního kmitočtu. Je proto výhodné zvolit dělicí kmitočet co „nejdále“ od rezonančního kmitočtu reproduktoru. Omezit tuto kmitočtovou závislost impedance lze také jednoduchým odporovým děličem, který zároveň vyrovná citlivosti obou reproduktorů (citlivost výškového reproduktoru bývá zpravidla vyšší). Vzorce pro výpočet hodnot rezistorů v odporovém děliči je podle [1]:

$$R_{22} = 10^{\frac{A}{20}} \frac{R_E}{1 - 10^{\frac{A}{20}}}, \quad R_{21} = R_E - \frac{1}{\frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_E}} \quad (5.12), (5.13)$$

kde  $R_{22}$  a  $R_{21}$  jsou hodnoty rezistorů v odporovém děliči,  $A$  zisk v dB (vyjádřen v záporné hodnotě) a  $R_E$  stejnosměrný odpor cívky výškového reproduktoru. Poté vybereme z řady rezistorů ten s nejbližší hodnotou, skutečný útlum pak bude [1]:

$$A = 20 \log \frac{\frac{R_{22} \cdot R_E}{R_{22} + R_E}}{R_{21} + \frac{R_{22} \cdot R_E}{R_{22} + R_E}} \quad (5.14)$$

Útlumový člen a reproduktor budou zatěžovat výhybku odporem  $R_Z$  [1]:

$$R_Z = R_{21} + \frac{R_{22} \cdot R_E}{R_{22} + R_E} \quad (5.15)$$

### 5.1.1 Hodnoty součástek vypočtené podle vzorců

Výpočet hodnot součástek dolní a horní propusti podle vztahů (5.5), (5.6), (5.7), (5.8), (5.9):

$$L_{11} = \frac{Z_D}{\pi \cdot f_{DD}} = \frac{8}{\pi \cdot 3000} = 0,8488 \text{ mH} \quad (5.16)$$

$$C_{11} = \frac{1}{4\pi \cdot f_{DD} \cdot Z_D} = \frac{1}{4\pi \cdot 3000 \cdot 8} = 3,3157 \mu F \quad (5.17)$$

$$L_{21} = \frac{3 \cdot Z_H}{8\pi \cdot f_{DH}} = \frac{3 \cdot 8}{8\pi \cdot 3000} = 0,3183 mH \quad (5.18)$$

$$C_{21} = \frac{1}{3\pi \cdot f_{DH} \cdot Z_V} = \frac{1}{3\pi \cdot 3000 \cdot 8} = 4,4210 \mu F \quad (5.19)$$

$$C_{22} = 3 \cdot C_{21} = 3 \cdot 4,4210 = 13,2629 \mu F \quad (5.20)$$

Výpočet hodnot součástí kompenzačního RC členu podle vztahů (5.10), (5.11):

$$R_{11} = R_E = 5,9 \Omega \quad (5.21)$$

$$C_{12} = \frac{L_E}{R_E^2} = \frac{0,5e^{-3}}{5,9^2} = 14,3637 \mu F \quad (5.22)$$

Výpočet hodnot rezistorů v odporovém děliči podle vztahů (5.12), (5.13):

$$R_{22} = 10^{\frac{A}{20}} \cdot \frac{R_E}{1 - 10^{\frac{A}{20}}} = 10^{\frac{-2}{20}} \cdot \frac{6}{1 - 10^{\frac{-2}{20}}} = 23,17 \Omega \quad (5.23)$$

$$R_{21} = R_E - \frac{1}{\frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_E}} = 6 - \frac{1}{\frac{1}{23,17} + \frac{1}{6}} = 1,23 \Omega \quad (5.24)$$

Vybral jsem nejbližší hodnoty rezistorů z řady E24  $R_{22} = 24,0 \Omega$ ,  $R_{21} = 1,2 \Omega$ .

Skutečný útlum je pak podle vztah (5.14):

$$A = 20 \log \frac{\frac{R_{22} \cdot R_E}{R_{22} + R_E}}{\frac{R_{21} + \frac{R_{22} \cdot R_E}{R_{22} + R_E}}{1,2 + \frac{24,6}{24 + 6}}} = 20 \log \frac{\frac{24 \cdot 6}{24 + 6}}{1,2 + \frac{24,6}{24 + 6}} = 1,94 dB \quad (5.25)$$

Útlumový člen a reproduktor budou zatěžovat výhybku odporem  $R_Z$  podle vztahu (5.15):

$$R_Z = R_{21} + \frac{R_{22} \cdot R_E}{R_{22} + R_E} = 1,2 + \frac{24,6}{24 + 6} = 6 \Omega \quad (5.26)$$

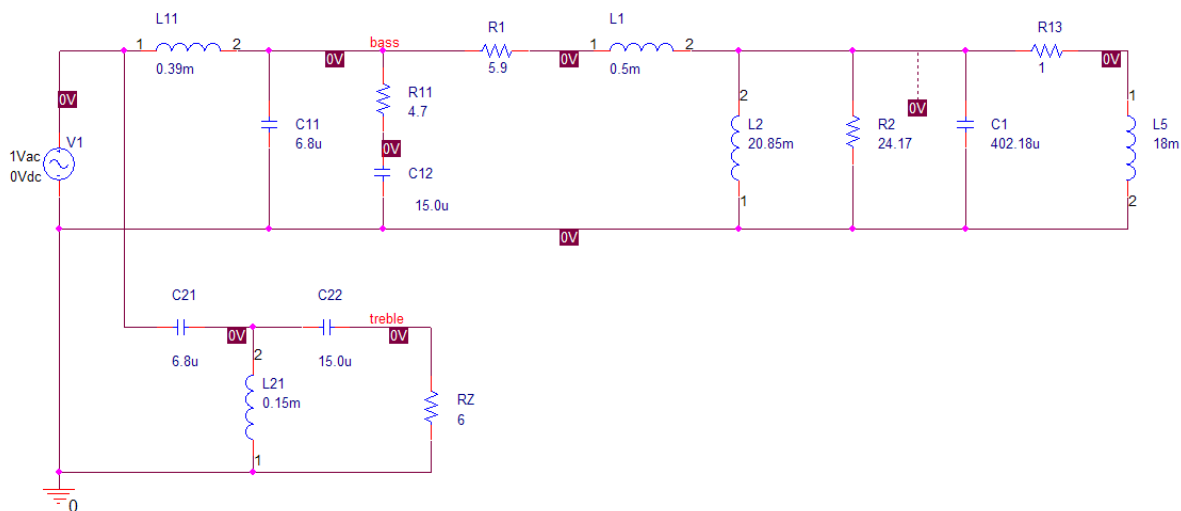
### 5.1.2 Hodnoty součástí nalezené simulací

Optimální hodnoty součástí byly určeny postupnou změnou hodnot součástí pro dosažení co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiky. Hodnoty byly měněny s ohledem na dostupnost jednotlivých součástí pro výrobu výhybek.

$$L_{11} = 0,39 mH, \quad C_{11} = 6,8 \mu F, \quad R_{11} = 4,7 \Omega, \quad C_{12} = 15,0 \mu F, \quad C_{21} = 6,8 \mu F, \quad L_{21} = 0,15 mH, \\ C_{22} = 15,0 \mu F$$

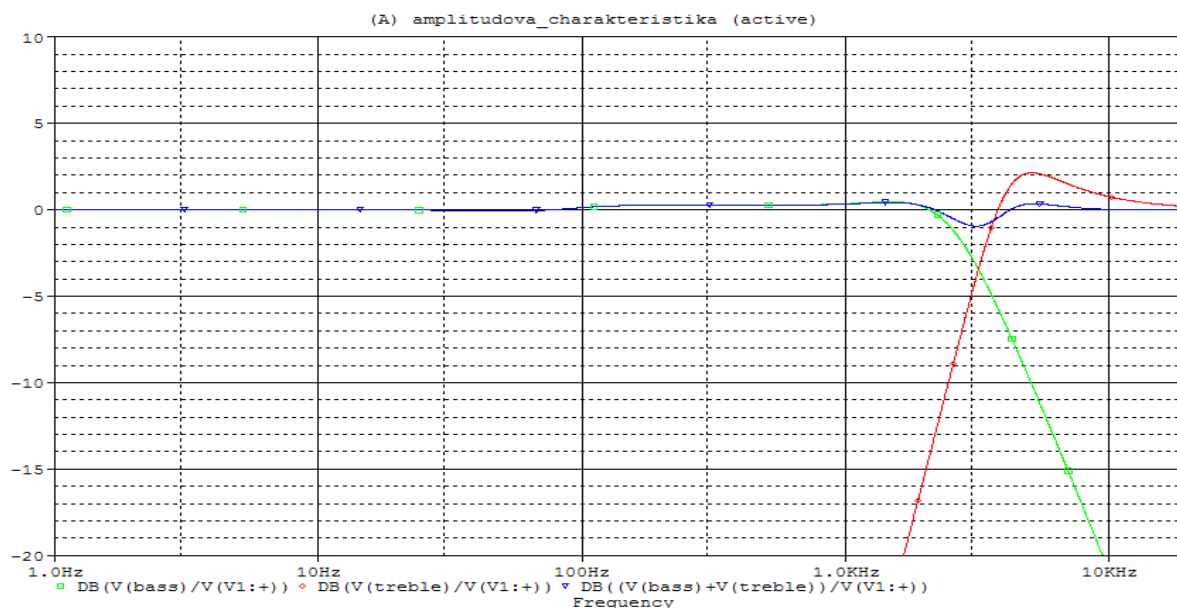
## 5.2 Simulace výhybky

Výsledné schéma výhybky pro basovou a výškovou větev, s hodnotami součástek nalezené simulací, zatíženou reproduktory je na Obr. 17.



Obr. 17: Schéma výhybky pro basovou a výškovou větev, zatíženou reproduktory

Byla odsimulována jak amplitudová frekvenční charakteristika pro basovou větev (zelená křivka) a výškovou větev (červená křivka), tak i součtová amplitudová frekvenční charakteristika (modrá křivka). Výsledné průběhy jsou na Obr. 18.



Obr. 18: Simulace amplitudové frekvenční charakteristiky výhybky pro basový a výškový reproduktor

Dělicí kmitočet byl určen jako geometrický průměr mezních frekvencí pro basovou a výškovou větev, a to 3,17 kHz. Na součtové frekvenční charakteristice je největší pokles o 0,94 dB na frekvenci 3,14 kHz. Je tak splněn požadavek co nejmenšího zvlnění na frekvenční charakteristice (nejvíce 1 dB).

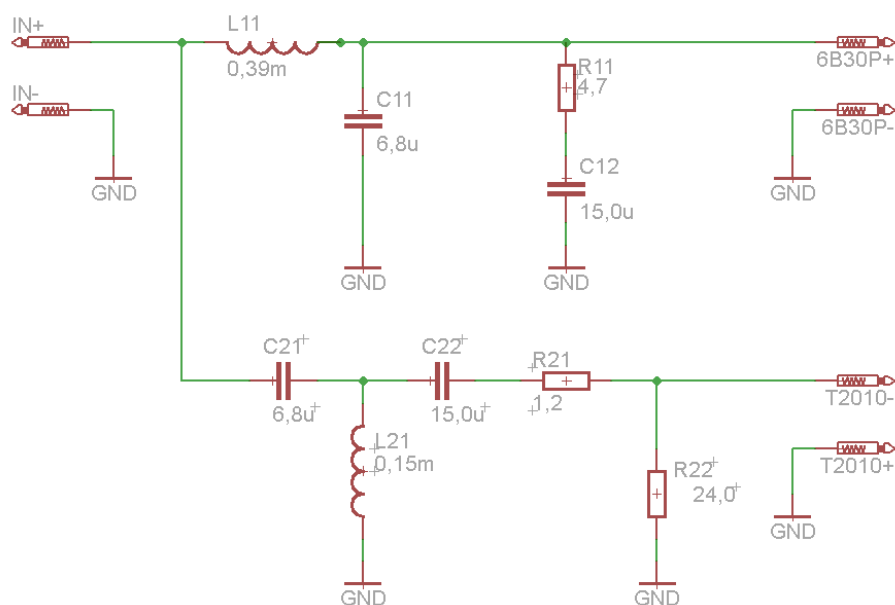


## 5.3 Konstrukční podklady pro stavbu výhybky

Pro zhotovení konstrukčních podkladů k výrobě výhybky byl použit návrhový systém Eagle.

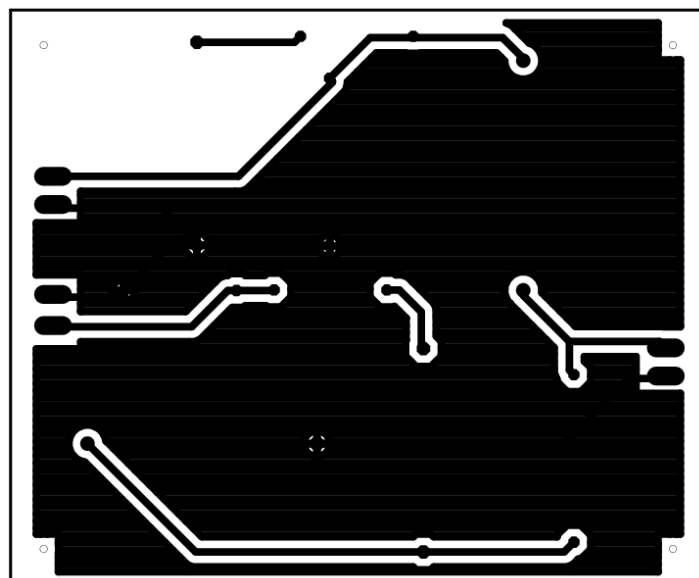
### 5.3.1 Navržené schéma výhybky

Navržené schéma výhybky je na Obr. 19.



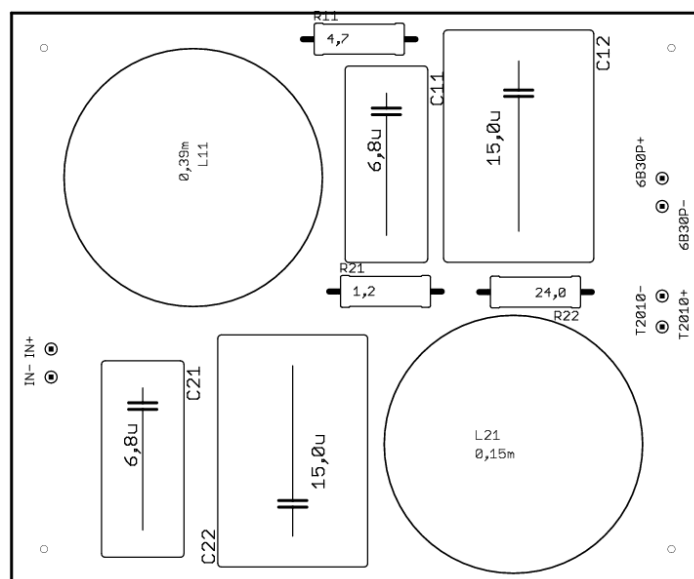
Obr. 19: Navržené schéma výhybky

### 5.3.2 Deska plošného spoje výhybky – bottom (strana spojů)



Obr. 20: Deska plošného spoje výhybky – bottom (strana spojů), rozměr desky 94 x 77 [mm], měřítko M 1:1

### 5.3.3 Deska plošného spoje výhybky – top (strana součástek)



Obr. 21: Deska plošného spoje výhybky – top (strana součástek), rozměr desky 94 x 77 [mm], měřítko M 1:1

### 5.3.4 Seznam součástek

V Tab. 4 je uveden seznam součástek pro konstrukci výhybky.

Tab. 4: Seznam součástek pro konstrukci výhybky

Označení	Hodnota	Popis
C11	6,8 µF	Svitkový kondenzátor
C12	15,0 µF	Svitkový kondenzátor
C21	6,8 µF	Svitkový kondenzátor
C22	15,0 µF	Svitkový kondenzátor
L11	0,39 mH	Vzduchová cívka
L21	0,15 mH	Vzduchová cívka
R11	4,7 Ω	Výkonový keramický rezistor
R21	1,2 Ω	Výkonový keramický rezistor
R22	24,0 Ω	Výkonový keramický rezistor
Pájecí ploška (6x)	-	-

## 6 Stavba reprosoustavy

### 6.1 Realizace výhybky

Při stavbě výhybky bylo vycházeno z konstrukčních podkladů. Všechny součástky jsou od firmy Dexon [5]. Kondenzátory jsou svitkové, cívky vzduchové a rezistory keramické, výkonové (viz. Obr. 22).



Obr. 22: Realizace výhybky

### 6.2 Realizace ozvučnice

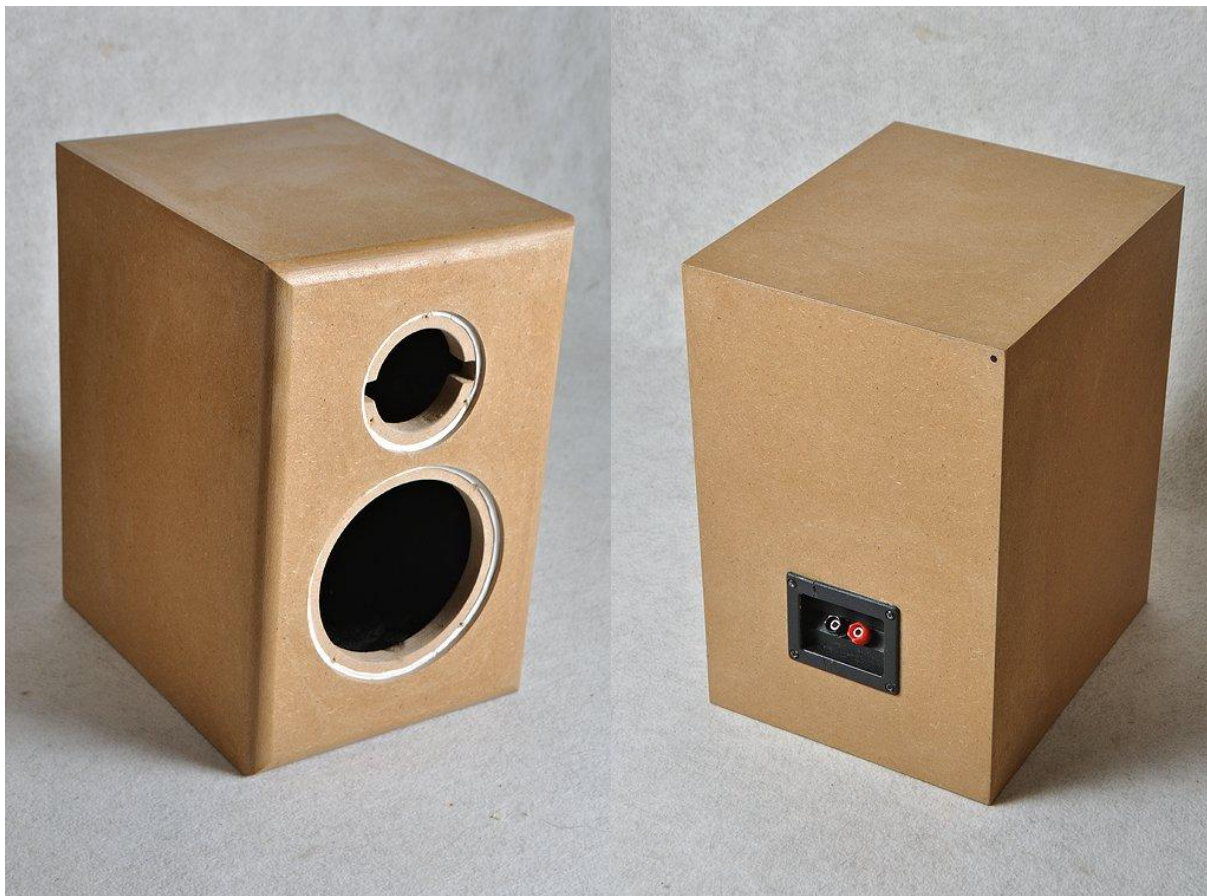
Při výrobě ozvučnice bylo postupováno podle konstrukčního návodu. Je použita M.D.F. deska o tloušťce 22 mm, namísto 18 mm. Při zachování vnitřního objemu reprosoustavy to znamená, že rozměry ozvučnice narostly o 8 mm na výšku a šířku. Přední stěna je zaoblená. Kvůli zpevnění přední stěny je použita výztuha mezi basovým a výškovým reproduktorem o tloušťce 3 cm. Pro spojení stěn ozvučnice je použit speciální rohový spoj, navíc utěsněný silikonovým lepidlem (viz. Obr. 23).



Obr. 23: Rohový spoj ozvučnice

Přístup do vnitřního prostoru ozvučnice je tak možný jen přes otvor basového, popřípadě výškového reproduktoru nebo otvor terminálu. Tuto nevýhodu však kompenzuje fakt, že ozvučnice je velmi pevná a „chová se“ jako jeden kus. Ukázka ozvučnice je na Obr. 24.

K vytlumení vnitřního prostoru ozvučnice je použita polyesterová tlumící vata od firmy FK technics [8].



**Obr. 24: Přední a zadní strana ozvučnice**

Reproduktory i terminál jsou uchyceny 20 mm vruty. K vzduchotěsné montáži a k utěsnění reproduktorů proti vibracím je použita samolepící těsnící páska také od firmy FK technics. Použita je také na utěsnění terminálu.

K úpravě povrchu stěn ozvučnice je použit bezbarvý, lesklý, vodou ředitelný lak na dřevo SPORTAKRYL Lesk V 1602. Konečná realizace ozvučnice osazenou reproduktory je na Obr. 25.



**Obr. 25: Ozvučnice osazená reproduktory**

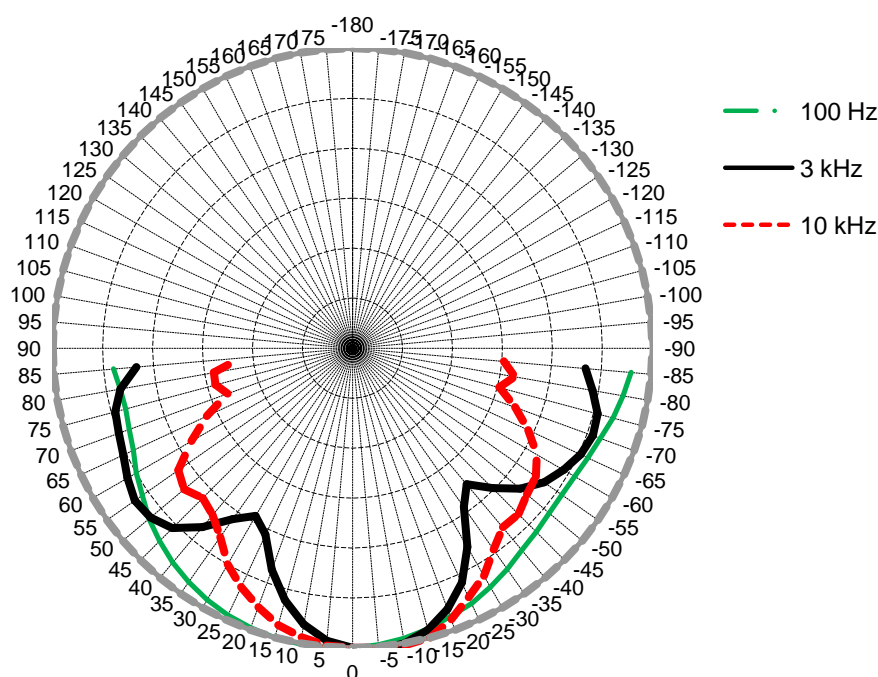


## 7 Měření reprosoustavy

Základními parametry, které dávají informace o tom, co reprosoustava dělá se vstupním signálem, je elektroakustický činitel přenosu a směrové charakteristiky. Elektroakustický činitel přenosu je poměr mezi akustickým tlakem v jistém bodě prostoru k napětí na vstupu reproduktorové soustavy, které tento tlak vybudilo. Nejvíce nás zajímá závislost tohoto činitele přenosu na kmitočtu budícího harmonického signálu. Zpravidla se tato závislost udává graficky jako závislost absolutní hodnoty činitele přenosu na kmitočtu v logaritmickém měřítku. Pak můžeme mluvit o závislosti jako o amplitudové frekvenční charakteristice. Měření amplitudové frekvenční charakteristiky i směrové charakteristiky reprosoustavy bylo provedeno v laboratoři studiové a hudební elektroniky na ústavu telekomunikací. Měřicí mikrofon byl umístěn v bezodrazové komoře ve vzdálenosti 1 m od reprosoustavy v ose reproduktorů, ve výšce mezi basovým a výškovým měničem. Reprosoustava byla buzena harmonickým signálem.

### 7.1 Směrové charakteristiky reprosoustavy

Měření směrové charakteristiky reprosoustavy bylo provedeno pro tři různé kmitočty, a to 100 Hz, 3000 Hz a 10 000 Hz (viz. Obr. 26).



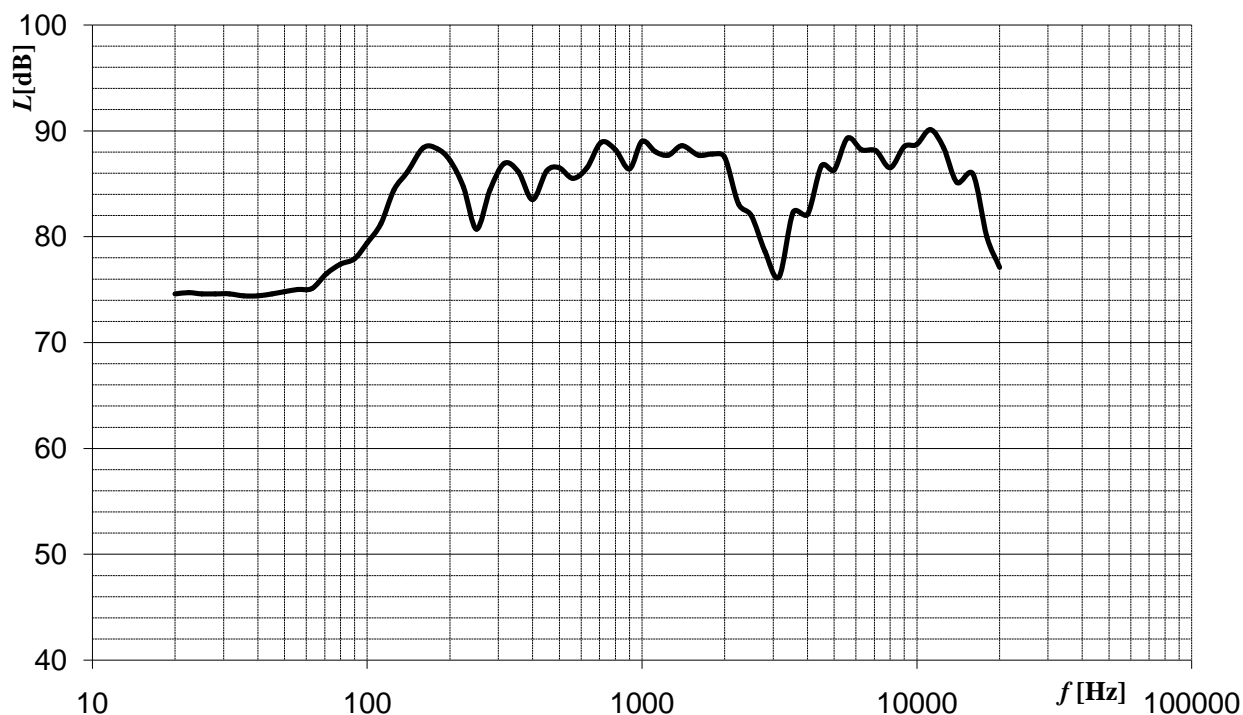
Obr. 26: Směrové charakteristiky reprosoustavy

Naměřené hodnoty směrových charakteristik jsou uvedeny v příloze číslo 4.

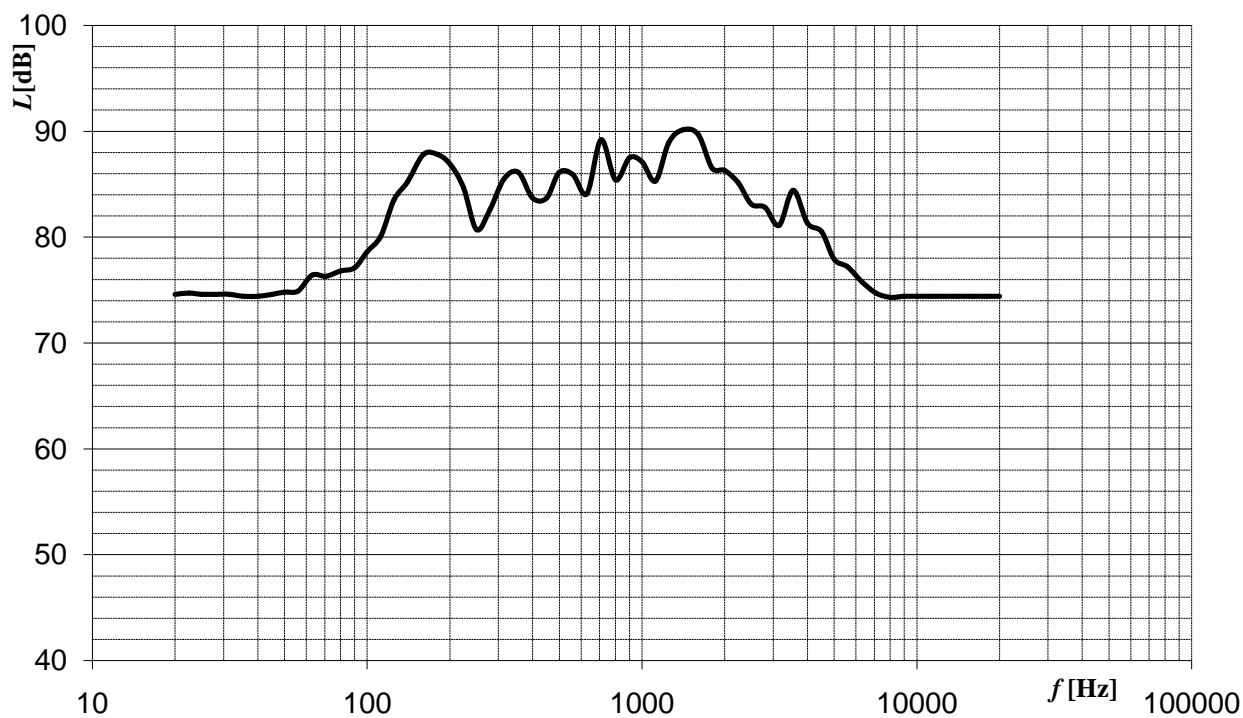
Ze směrových charakteristik je patrné, že čím vyšší kmitočty na reprosoustavu přivedeme, tím větší zvlnění na charakteristice bude. To znamená více vyzářeného výkonu v bočních směrech. Pro jakostní poslech je tedy nutné, aby byl posluchač v ose reproduktorů.

## 7.2 Amplitudová kmitočtová charakteristika reprosoustavy

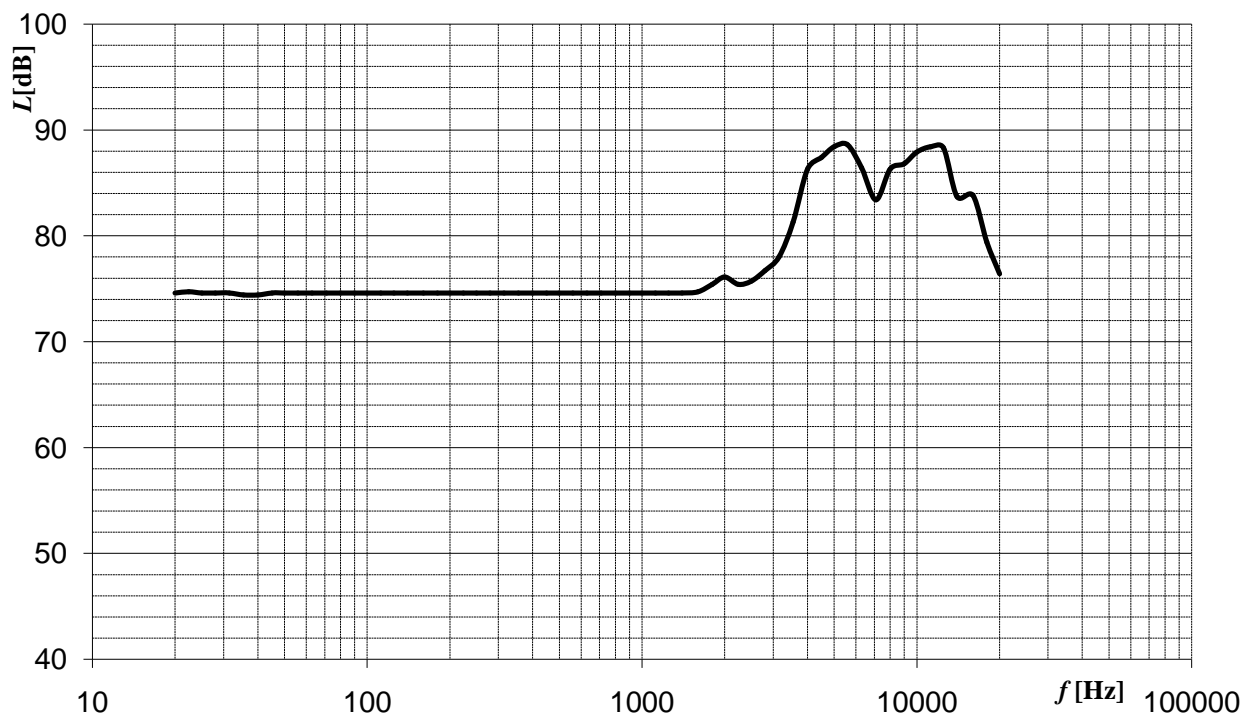
Amplitudovou kmitočtovou charakteristiku reprosoustavy byla nejdříve změřena s oběma zapojenými reproduktory (viz. Obr. 27). Poté byla charakteristika změřena jen pro basový reproduktor při odpojení výškovém měniči (viz. Obr. 28) a také pro výškový reproduktor se zároveň odpojeným basovým měničem (viz. Obr. 29).



Obr. 27: Amplitudová frekvenční charakteristika reprosoustavy



Obr. 28: Amplitudová frekvenční charakteristika reproduktory s odpojeným výškový měničem



Obr. 29: Amplitudová frekvenční charakteristika reproduktory s odpojeným basovým měničem



Naměřené hodnoty amplitudových frekvenčních charakteristik jsou uvedeny v příloze číslo 5.

Z naměřené součtové amplitudové frekvenční charakteristiky (oba reproduktory zapojeny) je zřejmý velký propad kolem frekvence 3150 Hz. Od této frekvence je už patrný pokles amplitudy elektroakustického činitele přenosu pro basový reproduktor. Na tomto kmitočtu už by měl „zabírat“ výškový reproduktor, ten však dosahuje požadovaných hodnot amplitudy činitele přenosu až od kmitočtu přibližně 3650 Hz. Zlepšení součtové amplitudové frekvenční charakteristiky tedy dosáhneme snížením mezní frekvence pro výškový reproduktor, přibližně o 500 Hz. Toho docílíme změnou hodnoty kondenzátoru C21 na 9,1  $\mu\text{F}$ . Reprosoustava pak bude hrát ve frekvenčním rozsahu 100 až 18 000 Hz se zvlněním  $\pm 5$  dB (jako referenční hodnota je vzata 85 dB).

## 8 Závěr

Bylo vytvořeno elektrické a konstrukční řešení reprosoustavy pro ozvučení domácího pokoje. Sestava je dvoupásmová, instalovaná do uzavřené ozvučnice. Je použit basový hifi reproduktor Beyma 6B30/P a výškový hifi reproduktor Beyma T-2010. Při dodržení všech rozměrů a tloušťek materiálů podle konstrukčních podkladů by měla být reprosoustava schopna vyrovnaně zahrát kmitočty přibližně od 70 Hz až do 20 kHz. Zvlnění se může projevit hlavně kolem dělicího kmitočtu 3170 Hz vlivem výhybky. Je to tím, že hodnoty součástek pro její konstrukci jsou navrženy a odsimulovány pro náhradní schéma reproduktoru. To se ale může od reálného reproduktoru lišit. Všechny parametry potřebné pro výpočet jsem získal z katalogového listu reproduktorů od výrobce. Reálné parametry reproduktoru však mohou být odlišné, zpravidla horší. Skutečné parametry navržené reprosoustavy tak získáme až samotným měřením vyrobené sestavy. Pokud bude výsledná frekvenční charakteristika příliš zvlněná, musí se změnit hodnoty některých součástek na výhybce, například odmotáním drátu z cívky a reprosoustavu znova odměřit. Jedině takovým způsobem je možno dosáhnout cíleného optimálního výsledku.

Navržená reprosoustava byla realizována formou funkčního prototypu a odměřena. Při stavbě bylo vycházeno z konstrukčních podkladů. Ozvučnice je vyrobena z M.D.F. desky tloušťky 22 mm, vytlumená polyesterovou tlumící vatou. K vzduchotěsné montáži, k utěsnění terminálu a reproduktorů proti vibracím byla navíc použita samolepící těsnící páska. Maximální standardizovaný příkon reprosoustavy je 50 W, nominální impedance 8  $\Omega$ , vnitřní objem přibližně 15 litrů, citlivost 90 dB a hmotnost 10 kg. Reprosoustava je schopna zahrát kmitočty v rozsahu 100 až 18 000 Hz se zvlněním na amplitudové frekvenční charakteristice  $\pm 5$  dB.

## 9 Seznam použité literatury

- [1] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy*. Karviná: Dexon s.r.o., 2001. 212 s.
- [2] SÝKORA, B. Stavíme reproduktorové soustavy I-IX. *Praktická elektronika A Radio*. 10/1997 – 6/1998. Praha: AMARO, 1997-1998.
- [3] HÜTTL, O. *Návrh reprosoustavy z alternativních materiálů: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [4] DOLÍVKA, L.; HOSPODKA, J. *Návrh reproduktorových výhybek s uvažováním komplexní zátěže*. Akustické listy České akustické společnosti. Prosinec 2005, roč. 11, č. 4, s. 9–15.
- [5] Dexon Czech s.r.o. [online]. [cit. 6. února 2006]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.dexon.cz/>>.
- [6] Audioweb.cz. [online]. [cit. 27. prosince 2005]. Webové stránky věnované reproduktorům a stavbě reprosoustav. Dostupné na WWW: <<http://audioweb.cz/index.htm/>>.
- [7] Repromania.net. [online]. [cit. 16. srpna 2008]. Webové stránky věnované audiotechnice a stavbě reprosoustav. Dostupné na WWW: <<http://www.repromania.net/>>.
- [8] FK technics spol. s r.o. [online]. [cit. 17. února 2010]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://shop.fkt.cz/>>.

## 10 Seznam zkratek

SPL	Sound pressure level
D.T.D.	Dřevotřísková deska
M.D.F.	Medium Density Fibre Plate

## 11 Seznam příloh

**PŘÍLOHA 1. KATALOGOVÝ LIST BASOVÉHO REPRODUKTORU BEYMA 6B30/P**

**PŘÍLOHA 2. KATALOGOVÝ LIST VÝŠKOVÉHO REPRODUKTORU BEYMA T-2010**

**PŘÍLOHA 3. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKY**

**PŘÍLOHA 4. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK**

**PŘÍLOHA 5. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT AMPLITUDOVÝCH FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK**

# Příloha 1. Katalogový list basového reproduktoru Beyma 6B30/P



**-Studio-**



This 6"1/2 unit has been designed to provide a wide, smooth response in the low and mid frequency range, with reduced harmonic distortion due to the use of a copper ring on the pole piece, and polypropylene material in the cone construction for a clean, natural sound reproduction. This model is especially recommended for studio and domestic applications, in small size 2 or 3 way enclosures.

Modelo de 6"1/2 con unas características exclusivas para alta fidelidad: membrana de polipropileno y suspensión de goma de gran elongación y estructura magnética de gran tamaño. El resultado son unos bajos de gran impacto y unos medios nitidos y naturales para recintos de tipo bass-reflex o herméticos.

## SPECIFICATIONS

Nominal diameter	166 mm, 6.5 in.
Rated impedance	8 ohms
Power capacity*	50 w RMS
Program Power	80 Watts
Sensitivity	90 dB 2.83 v @ 1m @ 2π
Frequency range	50-12000 Hz
Recom. enclosure vol.	10/40 l 0.35/1.4 ft. <sup>3</sup>
Voice coil diameter	26 mm, 1 in.
Magnetic assembly weight	1 kg, 2.2 lb.
BL factor	5.9 N/A
Moving mass	0.014 kg
Voice coil length	14 mm.
Air gap height	6 mm.
X damage (peak to peak)	15 mm.

## MOUNTING INFORMATION

Overall diameter	166 mm, 6.53 in.
Bolt circle diameter	156 mm, 6.14 in.
Baffle cutout diameter:	
-Front mount	140 mm, 5.51 in.
-Rear mount	140 mm, 5.51 in.
Depth	78 mm, 3.07 in.
Volume displaced by driver	0.5 l 0.019 ft. <sup>3</sup>
Net weight	1.25 kg, 2.76 lb.
Shipping weight	1.5 kg, 3.3 lb.

## MATERIALS

Basket	Steel
Cone	Polypropylene
Surround	Rubber
Voice coil	Copper wire
Magnet	Ferrite

## THIELE-SMALL PARAMETERS\*\*

Resonant Frequency, $f_s$	55 Hz
D.C. Voice Coil Resistance, $R_e$	5.9 ohms
Mechanical Quality Factor, $Q_{ms}$	3.36
Electrical Quality Factor, $Q_{es}$	0.76
Total Quality Factor, $Q_{ts}$	0.62
Equivalent Air Volume to $C_{ms}$ , $V_{as}$	18 l
Mechanical Compliance, $C_{ms}$	599 $\mu$ m/N
Mechanical Resistance, $R_{ms}$	1.44 kg/s
Efficiency, $\eta_0$ (%)	0.4
Effective Surface Area, $S_d$ (m <sup>2</sup> )	0.014 m <sup>2</sup>
Maximum Displacement, $X_{max}$	4
Displacement Volume, $V_d$	56 cm <sup>3</sup>
Voice Coil Inductance, $L_e$ @ 1kHz	0.5 mH

## NOTES

\*The power capacity corresponds to the RMS maximum value that can dissipate the loudspeaker when a sinus signal is applied for a period of at least two hours.  
Program power is defined as the transducer's ability to handle normal music program material.

\*\* T-S parameters are measured after an exercise period using a preconditioning power test, using a velocity-current laser transducer, and will reflect the long term parameters, once the loudspeaker has been working for a short period of time.

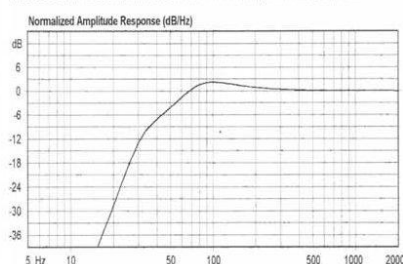
## NOTAS

\*La potencia admisible corresponde a la máxima potencia RMS que puede disipar el altavoz durante al menos dos horas, cuando se le aplica una señal senoidal determinada.

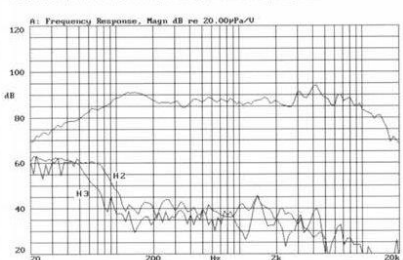
Por potencia programa se entiende la capacidad del altavoz en el manejo de señales transitorias, como sería el proporcionado por el contenido de un pasaje musical normal.

\* Los parámetros T-S han sido medidos después de un periodo de fatiga y estabilización de las suspensiones, mediante transductor laser de velocidad-corriente, y son el reflejo de los parámetros a largo plazo del altavoz, una vez este haya sido instalado y haya trabajado en un corto espacio de tiempo.

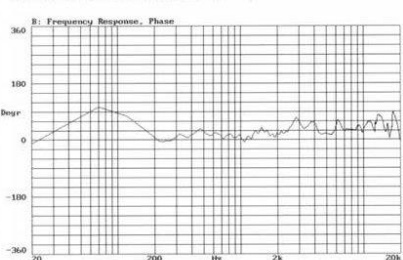
## PREDICTED LOW FREQUENCY RESPONSE • Bass-reflex cabinet, $V_b=15.00$ l, $f_b=45.0$ Hz



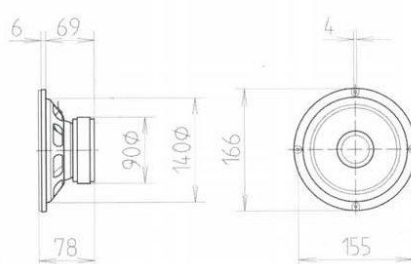
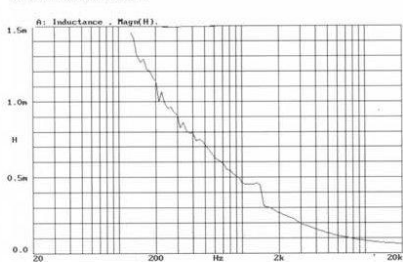
## FREQUENCY RESPONSE & DISTORTION CURVES, MAGN. On axis, 1w @ 1m.



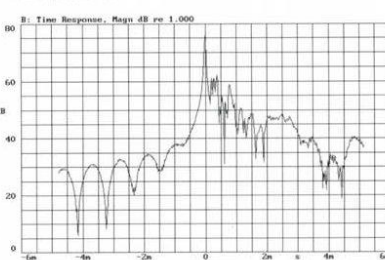
## FREQUENCY RESPONSE, PHASE. On axis, 1w @ 1m.



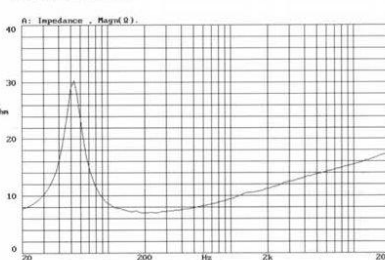
## VOICE COIL INDUCTANCE CURVE



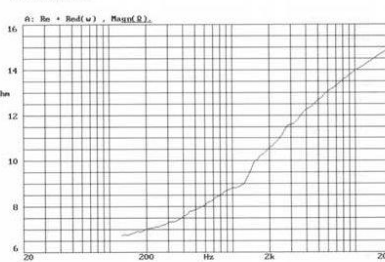
## TIME RESPONSE, MAGN.



## FREE AIR IMPEDANCE CURVE



## Re + Red(w) CURVE

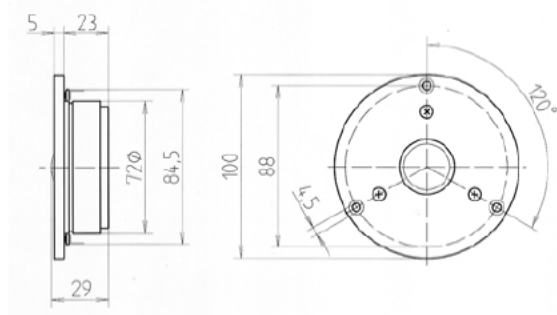


## Příloha 2. Katalogový list výškového reproduktoru Beyma T-2010

### -Studio-

This soft dome tweeter is designed for high frequency reproduction in two or three way studio or domestic systems. It features a plastic dome diaphragm and copper ring on the pole piece to achieve high efficiency in the upper range and low harmonic distortion. The coil-diaphragm assembly is easily field replaceable without soldering.

Este tweeter de cúpula blanda presenta una amplia respuesta en frecuencia, buena sensibilidad y amplia dispersión. Diseñado para sistemas muy compactos de 2 ó 3 vías.



#### SPECIFICATIONS

Nominal diameter	32mm, 1.25 in.
Nominal impedance	8 ohms
Minimum impedance	7.2 ohms @ 2 kHz
D.C. Resistance	6 ohms
Power capacity*	12 w RMS
Program Power	24 Watts
Efficiency**	92 dB 1w @ 1m.
Frequency range	1.5/20 kHz
Recommended crossover (minimum)	2 kHz or higher, 12 dB/oct.
Dispersion	80°
Voice coil diameter	25.8 mm, 1 in.
Magnetic assembly weight	0.48 kg, 1.05 lb.
Flux density	1.15 T
BL Factor	3.2 N/A

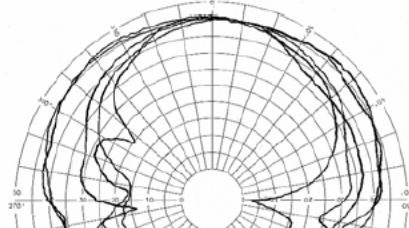
#### MOUNTING INFORMATION

Overall diameter	100 mm, 3.9 in.
Bolt circle diameter	88 mm, 3.46 in.
Baffle cutout dimensions:	75 mm, 2.95 in.
Front mount	29 mm, 1.14 in.
Depth	0.55 kg, 1.2 lb.
Net weight	0.6 kg, 1.32 lb.
Shipping weight	

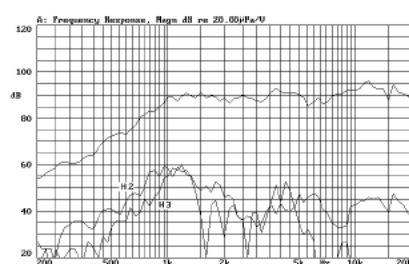
#### MATERIALS

Diaphragm	Supranyl
Voice coil	Aluminium
Former	Kapton
Front cover	Aluminium
Magnet	Ferrite

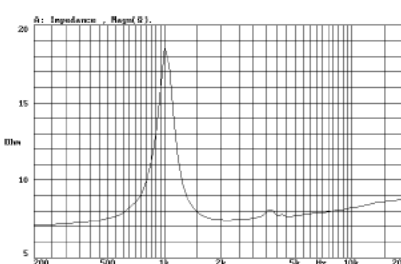
#### POLAR PATTERN



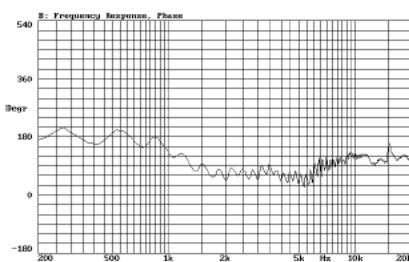
#### FREQUENCY RESPONSE & DISTORTION CURVES, MAGN. On axis, 1w @ 1m.



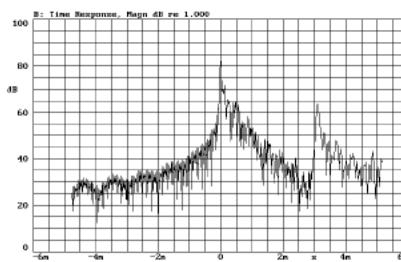
#### TIME RESPONSE, MAGN.



#### FREQUENCY RESPONSE, PHASE. On axis, 1w @ 1m.



#### FREE AIR IMPEDANCE CURVE



#### THIELE-SMALL PARAMETERS\*\*

Resonant Frequency, fs	1050 Hz
Mechanical Quality Factor, Qms	5.185
Electrical Quality Factor, Qes	2.394
Total Quality Factor, Qts	1.638

#### NOTES

\*The power capacity corresponds to the RMS maximum value that can dissipate the loudspeaker when a sinus signal is applied for a period of at least two hours.  
Program power is defined as the transducer's ability to handle normal music program material.  
\*\*Sensitivity was measured at 1m distance, on axis, with 1w input, averaged in the range 2-15 kHz.  
\*\*\* T-S parameters are measured after an exercise period using a preconditioning power test, using a velocity-current laser transducer, and will reflect the long term parameters, once the loudspeaker has been working for a short period of time.  
\*\*\*\*The polar plots are reproduction of measurements done with single sinusoidal signal tones, at the indicated frequencies. Rotation was about the centre of the emitter source, and the microphone is placed at 2m, on the axis.

#### NOTAS

\* La potencia admisible corresponde a la máxima potencia RMS que puede disipar el altavoz durante al menos dos horas, cuando se le aplica una señal determinada. Por potencia programa se entiende la capacidad de altavoz en el manejo de señales transitorias como sería el proporcionado por el contenido de un pasaje musical normal.  
\*\*Medición realizada con el micrófono a 1 m de distancia, en el eje, aplicando 1w al altavoz, promediando en el rango 2-15 kHz.  
\*\*\*Los parámetros T-S han sido medidos después de un período de fatiga y estabilización de las suspensiones, mediante transductor laser de velocidad-corriente, y son el reflejo de los parámetros a largo plazo del altavoz, una vez éste haya sido instalado y haya trabajado en un corto espacio de tiempo.  
\*\*\*\*Los gráficos polares fueron medidos con el tweeter situado sobre una mesa giratoria, sin pantalla, con el foco emisor sobre el eje de giro y situando el micrófono de medida a 2m. de distancia de dicho eje. Las señales usadas son tonos puros de las frecuencias representadas.

### Příloha 3. Tabulka naměřených hodnot impedanční charakteristiky

Frekvence $f$ [Hz]	Impedance $Z$ [ $\Omega$ ]
0	6,58
9	5,41
10	5,48
20	5,99
30	6,59
40	7,52
50	9,08
60	11,92
70	17,9
72	19,71
74	21,76
76	23,98
78	26,24
80	28,21
82	29,47
83	29,72
84	29,69
86	28,83
87	28,1
88	27,24
89	26,26

Frekvence $f$ [Hz]	Impedance $Z$ [ $\Omega$ ]
90	25,23
100	16,66
110	12,35
120	10,13
130	8,87
140	8,1
150	7,59
160	7,25
170	7,01
180	6,85
190	6,72
200	6,64
300	6,55
500	7,15
700	8,27
1000	8,82
2000	10,4
3000	11,49
5000	12,98
7000	13,57
10000	14,37

## Příloha 4. Tabulka naměřených hodnot směrových charakteristik

relativní úhel vůči akustické ose	$L$ [dBSPL]			$L_{REL}$ [dB]		
$\alpha$ [°]	100 Hz	3 kHz	10 kHz	100 Hz	3 kHz	10 kHz
-85	61,7	68,7	70,4	-2,0	-6,6	-14,8
-80	61,2	69,7	71,7	-2,5	-5,6	-13,5
-75	60,7	70,7	70,4	-3,0	-4,6	-14,8
-70	60,1	70,9	72,5	-3,6	-4,4	-12,7
-65	59,7	70,5	74,6	-4,0	-4,8	-10,6
-60	59,4	69,7	76,5	-4,3	-5,6	-8,7
-55	59,3	68,7	77,6	-4,4	-6,6	-7,6
-50	59,4	67,2	78,0	-4,3	-8,1	-7,2
-45	59,7	65,1	78,7	-4,0	-10,2	-6,5
-40	60,1	63,1	78,6	-3,6	-12,2	-6,6
-35	60,7	64,7	79,8	-3,0	-10,6	-5,4
-30	61,3	68,3	81,5	-2,4	-7,0	-3,7
-25	61,9	71,2	82,7	-1,8	-4,1	-2,5
-20	62,3	73,1	84,1	-1,4	-2,2	-1,1
-15	62,8	74,5	85,2	-0,9	-0,8	0,0
-10	63,2	75,3	85,4	-0,5	0,0	0,2
-5	63,5	75,6	85,3	-0,2	0,3	0,1
0	63,7	75,3	85,2	0,0	0,0	0,0
5	63,8	74,7	85,1	0,1	-0,6	-0,1
10	63,8	73,4	84,6	0,1	-1,9	-0,6
15	63,7	71,4	83,9	0,0	-3,9	-1,3
20	63,5	68,9	82,8	-0,2	-6,4	-2,4
25	63,2	65,9	81,6	-0,5	-9,4	-3,6
30	62,8	64,7	80,2	-0,9	-10,6	-5,0
35	62,3	66,2	78,3	-1,4	-9,1	-6,9
40	61,7	68,7	77,0	-2,0	-6,6	-8,2
45	61,0	70,8	76,4	-2,7	-4,5	-8,8
50	60,3	71,7	77,2	-3,4	-3,6	-8,0
55	59,4	71,9	76,5	-4,3	-3,4	-8,7
60	58,7	71,3	73,8	-5,0	-4,0	-11,4
65	57,9	70,6	71,3	-5,8	-4,7	-13,9
70	57,5	70,2	68,5	-6,2	-5,1	-16,7
75	57,2	69,9	69,4	-6,5	-5,4	-15,8
80	57,3	68,9	69,3	-6,4	-6,4	-15,9
85	57,7	67,0	66,4	-6,0	-8,3	-18,8

## Příloha 5. Tabulky naměřených hodnot amplitudových frekvenčních charakteristik

<i>f</i> [Hz]	<i>Oba reproduktory</i>
	<i>L</i> [dB <sub>SPL</sub> ]
40	74,4
45	74,6
50	74,8
56	75
63	75,1
71	76,5
80	77,4
90	77,9
100	79,4
112	81,2
125	84,4
140	86,1
160	88,4
180	88,3
200	87,2
224	84,7
250	80,7
280	84,4
315	86,9
355	86,1
400	83,5
450	86,2
500	86,5
560	85,5
630	86,5
710	88,9
800	88,2
900	86,4
1000	89
1120	88
1250	87,7
1400	88,6
1600	87,7
1800	87,8
2000	87,5
2240	83,1
2500	82
2800	78,6
3150	76,2
3550	82,3
4000	82,1
4500	86,7
5000	86,3
5600	89,3
6300	88,2
7100	88,1
8000	86,5
9000	88,5
10000	88,7
11200	90,1
12500	88,4
14000	85,1
16000	85,9
18000	80
20000	77,1

<i>f</i> [Hz]	<i>Zapojen pouze basový</i>
	<i>L</i> [dB <sub>SPL</sub> ]
40	74,4
45	74,6
50	74,8
56	74,9
63	76,4
71	76,3
80	76,8
90	77,1
100	78,6
112	80,1
125	83,5
140	85,2
160	87,8
180	87,8
200	86,9
224	84,7
250	80,7
280	82,6
315	85,5
355	86,1
400	83,7
450	83,7
500	86,1
560	85,9
630	84,1
710	89,2
800	85,4
900	87,5
1000	87,1
1120	85,3
1250	88,9
1400	90,1
1600	89,7
1800	86,5
2000	86,3
2240	85,1
2500	83,1
2800	82,8
3150	81,1
3550	84,4
4000	81,3
4500	80,5
5000	77,9
5600	77,2
6300	75,8
7100	74,7
8000	74,3
9000	74,4
10000	74,4
11200	74,4
12500	74,4
14000	74,4
16000	74,4
18000	74,4
20000	74,4

<i>f</i> [Hz]	<i>Zapojen pouze výškový</i>
	<i>L</i> [dB <sub>SPL</sub> ]
40	74,4
45	74,6
50	74,6
56	74,6
63	74,6
71	74,6
80	74,6
90	74,6
100	74,6
112	74,6
125	74,6
140	74,6
160	74,6
180	74,6
200	74,6
224	74,6
250	74,6
280	74,6
315	74,6
355	74,6
400	74,6
450	74,6
500	74,6
560	74,6
630	74,6
710	74,6
800	74,6
900	74,6
1000	74,6
1120	74,6
1250	74,6
1400	74,6
1600	74,7
1800	75,4
2000	76,1
2240	75,4
2500	75,7
2800	76,7
3150	78
3550	81,3
4000	86,3
4500	87,4
5000	88,4
5600	88,6
6300	86,4
7100	83,4
8000	86,3
9000	86,8
10000	87,9
11200	88,4
12500	88,3
14000	83,7
16000	83,8
18000	79,4
20000	76,4



